



**ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«СЕВЕРО - ОСЕТИНСКИЙ МЕДИЦИНСКИЙ КОЛЛЕДЖ»  
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РСО-АЛАНИЯ**

**Учебно-методический комплекс  
по дисциплине «Физика»**

**По специальности: 34.02.01 Сестринское дело**

**Форма обучения: очная**

**Уровень подготовки: базовый**

**Владикавказ 2022 г.**

Рассмотрена на заседании  
общеобразовательной ЦМК

Протокол №

От \_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Председатель

\_\_\_\_\_ С.С. Томаева

Рассмотрена и одобрена на заседании

методического совета ГБПОУ

«СОМК» МЗ РСО-Алания

Методист ГБПОУ

«СОМК» МЗ РСО-Алания

\_\_\_\_\_.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Организация-разработчик: ГБПОУ «Северо-Осетинский медицинский колледж».

Разработчик: Голлоева И.Ю., преподаватель гуманитарных дисциплин  
ГБПОУ «Северо-Осетинский медицинский колледж» МЗ РСО-Алания.

## 1. Введение. УВАЖАЕМЫЙ СТУДЕНТ!

Учебно-методический комплекс по дисциплине (далее УМКД) «Физика» создан Вам в помощь для работы на занятиях, при выполнении домашнего задания и подготовки к текущему и итоговому контролю по дисциплине.

УМКД включает теоретический блок, перечень практических занятий и/или лабораторных работ, задания по самостоятельному изучению тем дисциплины, вопросы для самоконтроля, перечень точек рубежного контроля, а также вопросы и задания по промежуточной аттестации (экзамена).

Приступая к изучению новой учебной дисциплины, Вы должны внимательно изучить список рекомендованной основной и вспомогательной литературы. Из всего массива рекомендованной литературы следует опираться на литературу, указанную как основную.

По каждой теме в УМК перечислены основные понятия и термины, вопросы, необходимые для изучения (план изучения темы), а также краткая информация по каждому вопросу из подлежащих изучению. Наличие тезисной информации по теме позволит Вам вспомнить ключевые моменты, рассмотренные преподавателем на занятии.

После изучения теоретического блока приведен перечень практических и лабораторных работ, выполнение которых обязательно. Наличие положительной оценки по практическим и лабораторным работам необходимо для получения зачета по дисциплине и допуска к экзамену, поэтому в случае отсутствия на уроке по уважительной или неуважительной причине Вам потребуется найти время и выполнить пропущенную работу. В процессе изучения дисциплины предусмотрена самостоятельная внеаудиторная работа, включающая проработку конспектов занятий, учебной и специальной технической литературы (по вопросам к параграфам, главам учебных пособий, составленным преподавателем), поиска информации и отчета в форме компьютерной презентации, оформления лабораторной работы, отчета и подготовки к её защите.

Содержание рубежного контроля (точек рубежного контроля) составлено на основе вопросов самоконтроля, приведенных по каждой теме. По итогам изучения дисциплины проводится экзамен. Экзамен сдается по билетам.

В результате освоения дисциплины Вы должны достичь следующих целей:  
– **освоение знаний** о фундаментальных физических законах и принципах, лежащих в основе современной физической картины мира: свойствах вещества и поля, пространственно-временных закономерностях, динамических и статистических законах природы, элементарных частицах и фундаментальных взаимодействиях, строении и эволюции Вселенной; знакомство с основами фундаментальных физических теорий - классической механики, молекулярно-кинетической теории, термодинамики, классической электродинамики, специальной теории относительности, элементов квантовой теории; наиболее

важных открытиях в области физики, оказавших определяющее влияние на развитие техники и технологии; методах научного познания природы;

– **овладение умениями** проводить наблюдения, планировать и выполнять эксперименты, выдвигать гипотезы и строить модели, применять полученные знания по физике для объяснения разнообразных физических явлений и свойств веществ; практически использовать физические знания; оценивать достоверность естественнонаучной информации;

– **развитие** познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей в процессе приобретения знаний и умений по физике с использованием различных источников информации и современных информационных технологий, выполнения экспериментальных исследований, подготовки докладов, рефератов и других творческих работ;

– **воспитание** убежденности в возможности познания законов природы, использования достижений физики на благо развития человеческой цивилизации; необходимости сотрудничества в процессе совместного выполнения задач, уважительного отношения к мнению оппонента при обсуждении проблем естественнонаучного содержания; готовности к морально-этической оценке использования научных достижений, чувства ответственности за защиту окружающей среды;

– **использование приобретенных знаний и умений** для решения практических задач повседневной жизни, объяснения явлений природы, свойств вещества, принципов работы технических устройств, обеспечения безопасности собственной жизни, рационального природопользования и охраны окружающей среды и возможность применения знаний при решении задач, возникающих в последующей профессиональной деятельности.

В результате изучения физики Вы должны **знать/понимать**:

– смысл понятий: физическое явление, физическая величина, модель, гипотеза, принцип, постулат, теория, пространство, время, инерциальная система отсчета, материальная точка, вещество, взаимодействие, идеальный газ, резонанс, электромагнитные колебания, электромагнитное поле, электромагнитная волна, атом, квант, фотон, атомное ядро, дефект массы, энергия связи, радиоактивность, ионизирующее излучение, планета, звезда, галактика, Вселенная;

– смысл физических величин: перемещение, скорость, ускорение, масса, сила, давление, импульс, работа, мощность, механическая энергия, момент силы, период, частота, амплитуда колебаний, длина волны, внутренняя энергия, средняя кинетическая энергия частиц вещества, абсолютная температура, количество теплоты, удельная теплоемкость, удельная теплота парообразования, удельная теплота плавления, удельная теплота сгорания, элементарный электрический заряд, напряженность электрического поля, разность потенциалов, емкость, энергия электрического поля, сила электрического тока, электрическое напряжение, электрическое сопротивление, электродвижущая

сила, магнитный поток, индукция магнитного поля, индуктивность, энергия магнитного поля, показатель преломления, оптическая сила линзы;

– смысл физических законов, принципов и постулатов (формулировка, границы применимости): законы динамики Ньютона, принципы суперпозиции и относительности, закон Архимеда, закон Гука, закон всемирного тяготения, законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда, основное уравнение кинетической теории газов, уравнение состояния идеального газа, законы термодинамики, закон Кулона, закон Ома для полной цепи, закон Джоуля-Ленца, закон электромагнитной индукции, законы отражения и преломления света, постулаты специальной теории относительности, закон связи массы и энергии, законы фотоэффекта, постулаты Бора, закон радиоактивного распада; основные положения изучаемых физических теорий и их роль в формировании научного мировоззрения;

– вклад российских и зарубежных ученых, оказавших наибольшее влияние на развитие физики;

**уметь:**

– описывать и объяснять результаты наблюдений и экспериментов: независимость ускорения свободного падения от массы падающего тела; нагревание газа при его быстром сжатии и охлаждение при быстром расширении; повышение давления газа при его нагревании в закрытом сосуде; броуновское движение; электризация тел при их контакте; взаимодействие проводников с током; действие магнитного поля на проводник с током; зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещения; электромагнитная индукция; распространение электромагнитных волн; дисперсия, интерференция и дифракция света; излучение и поглощение света атомами, линейчатые спектры; фотоэффект; радиоактивность;

– приводить примеры опытов, иллюстрирующих, что: наблюдения и эксперимент служат основой для выдвижения гипотез и построения научных теорий; эксперимент позволяет проверить истинность теоретических выводов; физическая теория дает возможность объяснять явления природы и научные факты; физическая теория позволяет предсказывать еще неизвестные явления и их особенности; при объяснении природных явлений используются физические модели; один и тот же природный объект или явление можно исследовать на основе использования разных моделей; законы физики и физические теории имеют свои определенные границы применимости;

– описывать фундаментальные опыты, оказавшие существенное влияние на развитие физики;

– применять полученные знания для решения физических задач;

– определять: характер физического процесса по графику, таблице, формуле; продукты ядерных реакций на основе законов сохранения электрического заряда и массового числа;

– измерять: скорость, ускорение свободного падения; массу тела, плотность вещества, силу, работу, мощность, энергию, коэффициент трения скольжения, влажность воздуха, удельную теплоемкость вещества, удельную теплоту плавления льда, электрическое сопротивление, ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока, показатель преломления вещества, оптическую силу линзы, длину световой волны; представлять результаты измерений с учетом их погрешностей;

– приводить примеры практического применения физических знаний: законов механики, термодинамики и электродинамики в энергетике; различных видов электромагнитных излучений для развития радио- и телекоммуникаций; квантовой физики в создании ядерной энергетики, лазеров;

– воспринимать и на основе полученных знаний самостоятельно оценивать информацию, содержащуюся в сообщениях СМИ, научно-популярных статьях; использовать новые информационные технологии для поиска, обработки и предъявления информации по физике в компьютерных базах данных и сетях (сети Интернета);

– использовать приобретенные знания и умения в практической деятельности и повседневной жизни для:

– обеспечения безопасности жизнедеятельности в процессе использования транспортных средств, бытовых электроприборов, средств радио- и телекоммуникационной связи;

– анализа и оценки влияния на организм человека и другие организмы загрязнения окружающей среды;

– рационального природопользования и защиты окружающей среды;

– определения собственной позиции по отношению к экологическим проблемам и поведению в природной среде;

**Внимание! Если в ходе изучения дисциплины у Вас возникают трудности, то Вы всегда можете прийти на дополнительные занятия к преподавателю, которые проводятся согласно графику. Время проведения консультаций Вы сможете узнать у преподавателя, а также познакомившись с графиком их проведения, размещенном на двери кабинета преподавателя.**

### **ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МАРШРУТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

<b>№.</b>	<b>Вид учебной работы</b>	<b>Кол-во часов</b>
<b>1.</b>	<b>Максимальная учебная нагрузка (всего)</b>	<b>176</b>
<b>2.</b>	<b>Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)</b>	<b>117</b>
	Теоретические занятия	<b>117</b>

	Практическое занятие	
3.	<b>Самостоятельная работа обучающегося (всего)</b>	<b>59</b>
	Реферат	
	Тематика внеаудиторной самостоятельной работы	

### ***Краткое содержание теоретического материала программы***

Раздел 1. Введение. Физика и познание мира.

Раздел 2. Механика.

Раздел 3. Строение вещества. Молекулярная физика.

Раздел 4. Электродинамика.

Раздел 5. Колебания и волны.

Раздел 6. Оптика.

Раздел 7. Квантовая физика.

Раздел 8. Астрономия.

## **Раздел 1. Введение**

Основные понятия и термины по теме: физика, физическая модель, научный метод, теория, эксперимент, физический закон, научная гипотеза.

План:

1. Физика — фундаментальная наука о природе. Естественнонаучный метод познания, его возможности и границы применимости.
2. Эксперимент и теория в процессе познания природы. Роль эксперимента и теории в процессе познания природы.
3. Физическая величина. Погрешности измерений физических величин.
4. Физические законы. Границы применимости физических законов.
5. Понятие о физической картине мира.
6. Значение физики при освоении профессий медицинского работника.

### **Краткое изложение теоретических вопросов:**

1. Физика — фундаментальная наука о природе. Естественнонаучный метод познания, его возможности и границы применимости

Физика – это наука, занимающаяся изучением основополагающих и вместе с тем наиболее общих свойств окружающего нас материального мира. В настоящее время физика очень тесно связана с астрономией, геологией, химией, биологией и другими естественными науками. Физика – наука о неживой природе. Поэтому понятие физики и её законы лежат в основе естествознания. Физика тесно связана с астрономией, геологией, химией, биологией и др. естественными науками. Например, открытие двойной спирали ДНК, "главной молекулы", было сделано в физической лаборатории. Это открытие определило пути развития молекулярной биологии, призванной ответить на вопрос, что такое жизнь.

Квантовая физика позволила химикам объяснить химическое строение вещества, законы распространения звука помогают геологам изучать земные недра.

Физика способствовала развитию многих областей математики. Английский физик Дж. Максвелл говорил: "Точные науки стремятся к тому, чтобы свести загадки природы к определению некоторых величин путем операций с числами". Английский ученый И. Ньютон создал дифференциальное и интегральное исчисления, пытаясь написать уравнения движения тел. Стремление к простоте математического описания позволило австрийскому физiku Э. Шредингеру записать уравнение, которое описывает мир атомов.

Естественнонаучный метод познания состоит в следующем: опираясь на опыт, отыскивают количественные (формулируемые математически) законы природы; открытые законы проверяются практикой. Дополнительную информацию можно получить лишь с помощью экспериментальных установок. Таким образом, схема научного познания выглядит так:

**Запомни:** наблюдение - гипотеза - теория - эксперимент.

**Важно:** именно эксперимент является критерием правильности теории.

**Запомни:** Наблюдение – это целенаправленный строгий процесс восприятия предметов действительности, которые не должны быть изменены. Наблюдение как метод познания применяется либо там, где невозможен или очень затруднен эксперимент (в астрономии, вулканологии, гидрологии), либо там, где стоит задача изучить именно естественное функционирование или поведение объекта (в этологии, социальной психологии и т.п.). Наблюдение как метод предполагает наличие программы исследования, формирующейся на базе прошлых убеждений, установленных фактов, принятых концепций. Частными случаями метода наблюдения являются измерение и сравнение. Суть любого эксперимента – наблюдение явления и получение данных, характеризующих результаты исследований.

**Запомни:** Эксперимент – метод познания, при помощи которого явления действительности исследуются в контролируемых и управляемых условиях.

**Важно:** Он отличается от наблюдения вмешательством в исследуемый объект, то есть активностью по отношению к нему. Проводя эксперимент, исследователь не ограничивается пассивным наблюдением явлений, а сознательно вмешивается в естественный ход их протекания путем непосредственного воздействия на изучаемый процесс или изменения условий, в которых проходит этот процесс.

**Запомни:** Научная гипотеза - высказанное суждение, недосказанное утверждение, предположение, объясняющее наблюдаемые явления или результаты лабораторных экспериментов.

Научная гипотеза всегда выдвигается для решения конкретной проблемы, чтобы объяснить полученные экспериментальные данные или устранить разногласия между теоретическими и экспериментальными результатами, полученными в ходе проверки ранее выдвинутых гипотез.



## 2. Эксперимент и теория в процессе познания природы. Роль эксперимента и теории в процессе познания природы

Любая созданная теория должна быть подтверждена экспериментом. Расхождение теории с практикой приводит к совершенствованию старой или созданию принципиально новой теории, дающей новые законы и более глубокое понимание физической реальности. Особенно ценной в науке считается теория, предсказывающая новые экспериментальные данные, которые не могут быть объяснены в рамках старой теории. Примером такой теории в физике является теория относительности Альберта Эйнштейна, предсказавшая и количественно описавшая изменение массы движущегося тела со скоростью, соизмеримой со скоростью света, явление, которое нельзя было объяснить в рамках теории классической физики.

**Важно:** Особенность фундаментальных теорий – их преемственность. Теория может иметь границы применимости. Например, классическая механика справедлива для описания движения тел, скорость которых много меньше скорости света, но с помощью законов Ньютона нельзя описать процессы в микромире. Ни одна научная теория не может быть признана окончательной и верной навсегда. Всегда существует вероятность, что новые наблюдения потребуют поправок к теории. Физику называют экспериментальной наукой. Дело в том, что опыт имеет в этой науке очень важное значение. Многие законы физики открыты благодаря наблюдениям за явлениями природы или специально поставленным опытам. Проводя опыт (эксперимент), физик как бы вопрошает природу. А для того, чтобы ее ответ был ясным и четким, требуется особое искусство: вопрос природе нужно задавать так, чтобы исключить различные толкования ответа, т. е. он должен быть однозначным и доказательным. Этот ответ природа дает в виде показаний приборов. В прошлом приборы были простыми. Считалось, что тот, кто не способен собрать нужный ему прибор из подручных материалов, имеющихся в любой лаборатории, стеклянных трубок, обрезков резиновых шлангов, палочек, сургуча и т. п. - недостоин звания физика. Со временем вопросы, которые физики задавали природе, стали более изощренными, касались все более тонких и сложных явлений, и приборы соответственно стали сложнее. Если есть возможность, эксперимент повторяют: воспроизводимость результатов - веский аргумент в пользу правильности полученных данных, позволяющий исключить случайную ошибку. В итоге у физиков скапливается целый ворох чисел, кривых, видеоматериалов и т. п., характеризующих исследуемое явление. В таком «сыром виде» информация труднообозрима, и работать с ней неудобно. Ее необходимо сжать, придав вид той или иной зависимости или записав в виде уравнения. Вывод уравнения всегда большая удача исследователя, но это не финал, а лишь новый шаг на долгом пути от первичных экспериментальных данных к ответу на вопрос, поставленный природе. Далее уравнения нужно решать. Иными словами, происходит важнейший процесс перехода от формальной (функциональной) зависимости к

содержательному описанию изучаемого явления. Однако уравнение и его решение - еще не окончательный итог поисков. В уравнении речь идет о функциональной зависимости, отвечающей на вопрос «как?», а не о причинной зависимости, отвечающей на вопрос «почему?» («с помощью какого механизма?»). Достигнув определенного уровня понимания исследуемого явления, физик делает следующий шаг - пытается построить его модель. Одним из мощных методов исследования в физике является метод моделирования.

*Запомни:* Моделирование - это процесс замены реального объекта, процесса или явления. Модель - это идеализация реального объекта или явления при сохранении основных свойств, определяющих данный объект или явление.

*Важно:* Модель должна сохранять те свойства реального объекта, которые определяют его поведение. Модели бывают теоретическими и лабораторными, в последнее время широко используются компьютерные модели.

*Основными физическими моделями являются:*

- материальная точка – тело, обладающее массой, размерами и формой которого можно пренебречь в условиях данной задачи (например, изучая движение планет по орбитам вокруг Солнца, можно принять их за материальные точки, так как размеры планет пренебрежительно малы по сравнению с размерами их траекторий движения);
- абсолютно твердое тело – тело, расстояние между любыми двумя точками которого всегда остается неизменным. Другими словами, данная модель пригодна в случаях, когда в задаче деформации тела при его взаимодействии с другими телами пренебрежительно малы;
- абсолютно упругое тело – тело, деформации которого пропорциональны вызывающим их силам, т.е. подчиняются закону Гука. После прекращения внешнего механического воздействия на такое тело, оно полностью восстанавливает свои размеры и форму;
- абсолютно неупругое тело – тело, которое после прекращения внешнего механического воздействия полностью сохраняет деформированное состояние, вызванное этим воздействием;
- идеальный газ – газ, молекулы которого имеют пренебрежимо малый собственный объем и между ними отсутствуют силы взаимодействия;
- идеальная жидкость – жидкость, в которой отсутствуют силы внутреннего трения (не учитывается вязкость);
- точечный электрический заряд – заряженное тело, форма и размеры которого несущественны по сравнению с расстояниями до других заряженных тел;

- электрический диполь – система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек электрического поля;
- абсолютно черное тело – тело, полностью поглощающее при любой температуре весь направленный на него поток излучения любой частоты.

3. Физическая величина. Погрешности измерений физических величин. В результате обобщения экспериментальных фактов устанавливаются физические законы – устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе. Наиболее важные законы устанавливают связь между физическими величинами, для чего необходимо эти величины измерять. Измерение физической величины – это действие, выполняемое с помощью средств измерений для нахождения значения физической величины в принятых единицах. В принципе единицы физических величин можно выбрать произвольно, но тогда возникнут трудности при их сравнении. Поэтому вводятся системы единиц, охватывающие единицы всех физических величин и позволяющие оперировать с ними. Для построения системы единиц произвольно выбирают единицы для нескольких не зависящих друг от друга физических величин. Эти единицы называются основными. Остальные величины и их единицы выводятся из законов, связывающих эти величины с основными. Они называются производными величинами. В России согласно государственному стандарту обязательна к применению Международная система единиц SI (система СИ).

## ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ (СИ)

Величина	Обозначение	Единица
Длина	$l$	метр (м)
Масса	$m$	килограмм (кг)
Время	$t$	секунда (с)
Сила тока	$I$	ампер (А)
Температура термодинамическая	$\Theta$	кельвин (К)
Сила света	$J$	кандела (кд)
Количество вещества	$N$	моль (моль)

### ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Перемещение	$s$	м	Объём	$V$	м <sup>3</sup>
Пройденный путь	$l$	м	Количество теплоты	$Q$	Дж
Скорость	$v$	м/с	Внутренняя энергия	$U$	Дж
Угловая скорость	$\omega$	рад/с	Теплоёмкость	$C$	Дж/К
Частота вращения	$\nu$	Гц	Электрический заряд	$q$	Кл
Период вращения	$T$	с	Напряжённость электрического поля	$E$	В/м
Длина волны	$\lambda$	м	Потенциал электрического поля	$\varphi$	В
Ускорение	$a$	м/с <sup>2</sup>	Электрическая ёмкость	$C$	Ф
Угловое ускорение	$\alpha$	рад/с <sup>2</sup>	Электрическое напряжение	$U$	В
Сила	$F$	Н	Сопротивление	$R$	Ом
Работа	$A$	Дж	Мощность тока	$P$	Вт
Энергия	$E$	Дж	Магнитная индукция	$B$	Тл
Мощность	$N$	Вт	Магнитный поток	$\Phi$	Вб
Момент силы	$M$	Н·м	Индуктивность	$L$	Гн
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>			
Молярная масса	$M$	кг/моль			
Давление	$p$	Па			

### ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИСТЕМЫ СИ

Гц	герц	с <sup>-1</sup>	В	вольт	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-3</sup> ·А <sup>-1</sup>
Н	ньютон	кг·м·с <sup>-2</sup>	Ф	фарад	кг <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> ·с <sup>4</sup> ·А <sup>2</sup>
Дж	джоуль	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup>	Ом	ом	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-3</sup> ·А <sup>-2</sup>
Вт	ватт	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-3</sup>	Тл	тесла	кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-1</sup>
Па	паскаль	кг·м <sup>-1</sup> ·с <sup>-2</sup>	Вб	вебер	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-1</sup>
Кл	кулон	А·с	Гн	генри	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-2</sup>

#### 4. Физические законы. Границы применимости физических законов.

*Запомни:* Физический закон – описание соотношений в природе, проявляющихся при определённых условиях эксперименте. Особенность закона состоит в том, что с его помощью можно описать другие явления, с которыми были поставлены эксперименты.

*Важно:* Физический закон - основанная на научных фактах устойчивая связь между повторяющимися явлениями, процессами и состояниями тел и других материальных объектов в окружающем мире. Физические законы обычно выражаются в виде короткого словесного утверждения или компактной математической формулы, связывающей между собой определённые физические величины. Теория, проверенная и подтвержденная многочисленными экспериментами, может рассматриваться как физический закон. Но у каждого закона есть границы применимости. Они определяются той теоретической моделью, в рамках которой рассматривается данный закон. Например, все законы, которым подчиняется реальный газ, выведенные на основе модели идеального газа, справедливы только для тех условий, при которых свойства реального газа приближены к свойствам идеального газа; закон Ома для участка цепи справедлив не для всех проводников, он не применим для ионизированного газа, но им можно воспользоваться только в определенном интервале значений силы тока, в котором можно считать сопротивление постоянным, ведь в действительности при прохождении тока проводник нагревается и его сопротивление увеличивается, следовательно, сила тока будет отличаться от расчетной.

#### 5. Понятие о физической картине мира.

По мере накопления экспериментальных данных постепенно вырисовывалась и складывалась величественная и сложная картина окружающего нас мира и Вселенной в целом. Научные поиски и исследования, проведенные на протяжении многих веков, позволили И. Ньютону (1643- 1727) открыть и сформулировать фундаментальные законы механики — науки о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними. В то время законы Ньютона казались настолько всеобъемлющими, что легли в основу построения механической картины мира, согласно которой все тела должны состоять из абсолютно твердых частиц, находящихся в непрерывном движении. Взаимодействие между телами осуществляется с помощью сил тяготения (гравитационных сил). Все многообразие окружающего мира, по Ньютону, заключалось в различии движения частиц. Механическая картина мира господствовала до тех пор, пока Дж. Максвеллом (1873г) не были сформулированы уравнения, описывающие основные закономерности электромагнитных явлений. Создание специальной теории относительности – нового учения о пространстве и времени – позволило полностью обосновать электромагнитную теорию Максвелла. В состав всех без исключения атомов входят электрически заряженные частицы. С помощью

электромагнитной теории можно объяснить природу сил, действующих внутри атомов, молекул и макроскопических тел. Это, положение и легло в основу создания электромагнитной картины мира, согласно которой все исходящие в окружающем нас мире явления пытались объяснить с помощью вагонов электродинамики. Однако объяснить строение и движение материи только электромагнитными взаимодействиями не удалось. Дальнейшее развитие физики показало, что кроме гравитационного и электромагнитного существуют и другие типы взаимодействия. В квантовой механике используется понятие дуализма: движущаяся материя является одновременно и веществом и полем, т.е. обладает одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. В классической же физике материя всегда либо совокупность частиц, либо поток волн. Развитие ядерной физики, открытие элементарных частиц, исследования их свойств и взаимопревращений привели к установлению еще двух типов взаимодействий, названных сильными и слабыми. Таким образом, современная физическая картина мира предполагает четыре типа взаимодействия: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное. Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре. Слабое взаимодействие проявляется в основном при распаде элементарных частиц. Таким образом, учение о строении материи в настоящее время является атомистическим, квантовым, релятивистским, в нем применяются статистические представления. В квантовой механике используется понятие дуализма: движущаяся материя является одновременно и веществом и полем, т.е. обладает одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. В классической же физике материя всегда либо совокупность частиц, либо поток волн. Развитие ядерной физики, открытие элементарных частиц, исследования их свойств и взаимопревращений привели к установлению еще двух типов взаимодействий, названных сильными и слабыми. Таким образом, современная физическая картина мира предполагает четыре типа взаимодействия: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное. Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре. Слабое взаимодействие проявляется в основном при распаде элементарных частиц. Таким образом, учение о строении материи в настоящее время является атомистическим, квантовым, релятивистским, в нем применяются статистические представления.

Значение физики при освоении профессий медицинского работника.

Физика тесно связана с естественными науками - астрономией, химией, биологией, геологией и др. В результате образовался ряд новых научных дисциплин, таких, как астрофизика, физическая химия, биофизика, радиоастрономия и др. Физика тесно связана и с техникой, причем эта связь двусторонняя: физика развивается из потребностей техники, с другой стороны, развитие техники позволяет совершенствовать экспериментальные методы физических исследований, применять новые, более совершенные приборы и

установки (электронные микроскопы, спектрографы, счетчики заряженных частиц и т.п.).

Лабораторные работы/ Практические занятия – не предусмотрены.

Задания для самостоятельного выполнения:

Проработка конспекта лекции, учебного материала.

Форма контроля самостоятельной работы: устный опрос.

Вопросы для самоконтроля по теме:

1. Какая наука называется физикой? В чем состоит естественнонаучный метод познания? Чем эксперимент отличается от наблюдения?
2. Что содержит научная теория? Что называется физическим законом, научной гипотезой? Чем постулат отличается от научной гипотезы?
3. Что собой представляет моделирование?
4. Перечислите основные элементы научной картины мира.

## Раздел 2. Механика

Механика – это часть физики, изучающая механическое движение материальных тел и происходящие при этом взаимодействия между ними. Под механическим движением понимают изменение с течением времени взаимного положения тел или их частиц в пространстве. В природе – это движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и водные течения и т.п.; в технике – движения различных летательных аппаратов и транспортных средств, частей двигателей, машин и механизмов, деформации элементов различных конструкций и сооружений, движения жидкостей и газов и многое другое.

В механике рассматриваемые взаимодействия представляют собой те действия тел друг на друга, в результате которых изменяются скорости точек этих тел или возникают деформации, например, притяжения тел по закону всемирного тяготения, взаимные давления соприкасающихся тел, воздействия частиц жидкости или газа друг на друга и на движущиеся в них тела.

Под механикой обычно понимают так называемую классическую механику Галилея-Ньютона, предметом изучения которой являются движения любых материальных тел (кроме элементарных частиц), совершаемые со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света. Движение макроскопических тел со скоростями порядка скорости света рассматривается релятивистской механикой, основанной на специальной теории относительности Эйнштейна. Для описания движения элементарных частиц и внутриатомных явлений законы классической механики неприменимы – они заменяются законами квантовой механики.

Классическая механика делится на три раздела: кинематику, динамику и статику. Кинематика изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обуславливают (т.е. движение тел без учета их масс и

действующих на них сил). Методы и зависимости, устанавливаемые в кинематике, используются при расчетах передач движения в различных механизмах и машинах, а также при решении задач динамики. Задача: дать математическое описание того, как движутся тела, без выяснения причин, почему они так движутся. Динамика изучает движение материальных тел под действием приложенных к ним сил. В динамике лежат законы механики Ньютона, из которых получаются все уравнения и теоремы, необходимые для решения задач динамики. Задача: объяснить, почему тела движутся именно так, а не иначе.

### **Основная задача механики – определить положение тела в любой момент времени.**

Основными понятиями в механике, физике и естествознании в целом являются пространство и время. Всякое материальное тело имеет объем, т.е. пространственную протяженность. Время выражает последовательность состояний материи, составляющих любой процесс, любое движение. Таким образом, пространство и время представляют собой наиболее общие формы существования материи.

Любое движение твердого тела можно представить как комбинацию поступательного и вращательного движений.

Поступательным движением называют движение, при котором любая прямая, жестко связанная с телом, перемещается, оставаясь параллельной самой себе. Примерами поступательного движения являются движение поршня в цилиндре двигателя, движение кабин «чертова колеса» и т.д.

Вращательным движением абсолютно твердого тела называют такое движение, при котором все точки тела движутся в плоскостях, перпендикулярных к неподвижной прямой, называемой осью вращения, и описывают окружности, центры которых лежат на этой оси (роторы турбин, генераторов и двигателей).

#### **Тема 1.1. Кинематика.**

Основные понятия и термины по теме: система отсчёта, материальная точка, тело отсчёта, перемещение, пройденный путь, траектория, скорость, ускорение, свободное падение, вращательное движение.

1. Механическое движение и его характеристики: перемещение, путь, скорость, ускорение.
2. Виды механического движения.
3. Свободное падение. Движение тела, брошенного под углом к горизонту.
4. Равномерное движение по окружности.

1. Механическое движение и его характеристики: перемещение, путь, скорость, ускорение.

Бежит собака, или мчится автомобиль - с ними происходит один и тот же процесс: их положение относительно земли и относительно вас изменяется с



течением времени. Они перемещаются. Сжимается пружина, прогибается доска, на которую вы сели, - изменяется положение различных частей тела относительно друг друга.

*Запомни:* Механическое движение – это изменение пространственного положения тела или частей тела относительно других тел с течением времени.

Механическое движение относительно, т.е. различно в разных системах координат. Например, ребёнок, впервые попавший на берег реки во время ледохода, спросил: «На чём это мы едем?». Очевидно, что ребёнок «выбрал» в качестве тела отсчёта плывущую льдину. Находясь в покое относительно берега ребёнок двигался вместе с берегом относительно «выбранной» им системы отсчёта – льдины.

Закон относительности движения: характер движения тела зависит от того, относительно каких рассматривается данное движение. Человечеству понадобилось около двух тысяч лет, чтобы встать на верный путь, который завершился открытием законов механического движения.

*Интересно:* Попытки древних философов объяснить причины движения, в том числе и механического, были плодом чистой фантазии. Подобно тому, рассуждали они, как утомлённый путник ускоряет шаги по мере приближения к дому, падающий камень начинает двигаться всё быстрее и быстрее, приближаясь к земле. Движения живых организмов, например кошки, казались в те времена гораздо более простыми и понятными, чем падения камня. Были, правда, и гениальные озарения. Так, греческий философ Анаксагор говорил, что Луна, если бы не двигалась, упала бы на Землю, как падает камень из пращи. Однако подлинное развитие науки о механическом движении началось с трудом великого итальянского физика Г. Галилея.

*Запомни:* Тело отсчёта – произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение движущейся материальной точки (тела). С телом отсчёта обычно связывают систему координат. С помощью системы координат определяют положение тела. Т.к. движение происходит во времени для описания движения необходимы часы. Всё это вместе составляют систему отсчёта.

*Запомни:* Система отсчёта – совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и часов.

**Важно:** ни одно явление, ни один процесс нельзя описать до тех пор, пока не выбрана та или иная система отсчёта.

Выбрать систему отсчёта – это значит:

- Указать, какое тело является телом отсчета.
- Выбрать точку, которая будет являться началом координат.
- Указать направления координатных осей.
- Выбрать событие, которое будет являться началом отсчёта времени.

Изучая механическое движение, в ряде случаев целесообразно не учитывать размеры и формы тела. Для простоты решения вводится модель тела, называемая материальной точкой.

*Запомни:* Материальная точка – тело, обладающее массой, размерами которого в данных условиях можно пренебречь. Действительно, если пассажира интересует, сколько времени самолёт будет лететь от Москвы до Новосибирска, то совершенно не нужно знать характер движения отдельных частей самолёта. Однако нельзя пренебречь размерами и формой самолёта при изучении таких явлений, как взлёт, посадка, сопротивление воздуха и т.п. Аналогично мы можем считать Землю и другие планеты материальными точками, если нас интересует характер их движения вокруг Солнца. Но если нужно выяснить причины смены дня и ночи или времён года, то ту же Землю уже нельзя считать точкой, а следует учесть её размеры, вращение вокруг своей оси, наклон этой оси к плоскости орбиты и т.п. Таким образом, одно и то же тело в одних задачах можно рассматривать как материальную точку, а в других так поступать нельзя. Материальная точка – простейшая физическая модель.

**Важно:** изучить движение тела – значит узнать, как изменяется его положение с течением времени.

Если это известно, то можно вычислить положение тела в любой момент времени. В этом и состоит основная задача механики – определить положение тела в любой момент времени. Для того, чтобы решить основную задачу механики, нужно кратко и точно указать, как движется тело, как его положение изменяется с течением времени. Другими словами, надо найти математическое описание движения, установить связь между величинами, характеризующими движение. Эта задача имеет смысл лишь в том случае, если движущаяся частица в каждый момент времени имеет определённые координаты. Но это приемлемо только для макромира, в микромире это утверждение не справедливо.

**Важно:** описать движение тела - это значит указать способ определения его положения в пространстве в любой момент времени.

Очень важной характеристикой при описании движения тела является траектория.

*Запомни:* Траектория – воображаемая линия, соединяющая положения материальной точки (тела) в ближайшие последовательные моменты времени.

Возможно, и непосредственные наблюдения траектории: искры, летящие при сварке, след в небе от выхлопных газов ракеты или самолёта, линия, рисуемая мелом на доске или ручкой в тетради, лыжный след. Также если поджечь конец прутика и вращать его в воздухе, то можно отчётливо увидеть (особенно в темноте) траекторию движения обуглившегося конца прутика. Форма траектории зависит от выбора системы отсчёта. Действительно, пусть, например, падает яблоко сверху вниз в вагоне, который движется относительно Земли. Траектория этого тела относительно вагона – прямая линия,

относительно Земли – кривая (при отсутствии сопротивления воздуха парабола). То же самое, можно сказать о траектории, которую описывает какая-либо точка пропеллера движущегося самолёта. В системе отсчёта, связанной с самолётом, эта точка движется по окружности; в системе же, связанной с Землёй, она движется по винтовой линии. Таким образом, форма траектории относительна. Положение материальной точки в любой момент времени удобно определять с помощью радиус-вектора.

**Запомни:** Радиус-вектор – вектор, соединяющий начало отсчёта с положением точки в произвольный момент времени. При движении точки конец радиус-вектора описывает траекторию движения.

**Запомни:** Перемещение материальной точки за промежуток времени  $t = t - t_0$  – вектор, равный разности радиусов-векторов, характеризующих конечное начальное положения движущейся точки. Перемещение ( $s$ ) – вектор, направленный из начального в конечное положение движущейся точки.

Расстояние, на которое смещается движущая точка от начального положения в конечное, определяет положительная скалярная величина – путь.

**Запомни:** Путь – длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени.

**Важно:** Модуль перемещения не может быть равен пройденному точкой пути.

Путь равен перемещению только в случае прямолинейного однонаправленного движения. Перемещение тела – вектор, путь – скаляр. Скорость является пространственно-временной характеристикой движения тела. Если, например, автомобиль проехал путь 500 м за 20 с, то можно предположить, что за секунду автомобиль проезжал 25 м. Однако реально в течение первых пяти секунд он мог двигаться медленно, следующие 8 с стоять, а последние 7 с двигаться очень быстро. Поэтому путь, проходимый телом в среднем за секунду, характеризует среднюю скорость.

Средняя скорость – скалярная величина, равная отношению пути к промежутку времени, затраченному на его прохождение. Средняя скорость, как и любая средняя величина, является достаточно приближительной характеристикой движения. Например, водитель, двигаясь на автомобиле, не раз посмотрит на спидометр, показывающий скорость движения в данный момент времени (в данное мгновение) – мгновенную скорость. Чем меньше интервал времени, тем меньше за это время успевают измениться скорость, тем точнее её можно определить, момент времени.

Мгновенная скорость – скорость движения тела в данный момент времени, или за бесконечно малый интервал времени. Мгновенная скорость тела направлена по касательной к траектории в сторону его движения. Физический смысл: модуль мгновенной скорости численно равен расстоянию, которое может пройти тело за единицу времени, продолжая двигаться так же, как оно двигалось в данный момент времени.

Скорость – векторная величина, равная отношению перемещения тела к промежутку времени, за который это перемещение произошло. Скорости можно складывать, они складываются, как и все векторы геометрически

Закон сложения скоростей: если тело движется относительно некоторой системы координат со скоростью и сама система движется относительно другой системы координат со скоростью, то скорость тела относительно второй системы равна геометрической сумме скоростей и

Закон сложения скоростей позволяет определять скорость тела относительно разных систем отсчёта, движущихся относительно друг друга. Проекции скоростей складываются алгебраически. При движении тел в одном направлении модуль относительной скорости равен разности скоростей. При встречном движении тела сближаются с относительной скоростью, равной сумме их скоростей, поэтому встречное столкновение тел очень опасно.

**Важно:** Классический закон сложения скоростей справедлив для тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света (300 000 км/с)

**Интересно:** часто скорость тела относительно неподвижной системы координат называют абсолютной скоростью, относительно подвижной системы координат – относительной, а скорость тела отсчета, связанного с подвижной системой, относительно неподвижной – переносной скоростью. Тогда закон сложения скоростей имеет вид.

Тело может на всём участке пути двигаться с одинаковой скоростью, она постоянно изменяется. Изменение скорости характеризует ускорение.

Ускорение – векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости материальной точки прошедшего за очень малый промежуток времени, к значению этого промежутка.

## 2. Виды механического движения.

По форме траектории механическое движение делится на два вида: криволинейное и прямолинейное.

**Криволинейным** называется движение, траекторией которого является кривая линия. **Прямолинейным** называется движение, траекторией которого является прямая линия.

Путь равен модулю вектора перемещения только при прямолинейном движении в одном направлении. Если направление прямолинейного движения изменяется, то путь превосходит модуль вектора перемещения. Например, автобус, движущийся из пункта А в пункт В, а затем возвращается обратно в А, проходит путь  $2l$ . При этом перемещение его относительно начальной точки равно 0. При криволинейном движении путь больше перемещения, т.к. длина дуги всегда больше перемещения.

Для получения уравнения равномерного прямолинейного движения точки воспользуемся определением скорости. Пусть радиус-вектор задает положение точки в начальный момент времени  $t_0$ . А радиус-вектор – в момент времени  $t$ . Тогда  $\Delta t = t - t_0$  и выражение для скорости принимает вид. Если

принять  $t_0=0$ , то, отсюда – уравнение равномерного прямолинейного движения точки, записанное в векторной форме. Оно позволяет найти радиус-вектор точки при этом движении в любой момент времени, если известны скорость точки и радиус-вектор, задающий её положение в начальный момент времени.

**Важно:** как бы ни была направлена скорость, путь, пройденный точкой, непрерывно увеличивается.

Равноускоренное прямолинейное движение – это прямолинейное движение, при котором ускорение параллельно и со направленно вектору скорости и постоянно по модулю.

Равнозамедленное прямолинейное движение - это прямолинейное движение, при котором ускорение параллельно и противоположно направлено вектору скорости и постоянно по модулю.

**Важно:** если известен график зависимости проекции скорости от времени, можно определить ускорение точки в любой момент времени, т.е. решить основную задачу кинематики. По графику зависимости координаты от времени можно определить одну из самых важных кинематических характеристик движения - скорость. Кроме этого, по указанным графикам можно определить тип движения вдоль выбранной оси: равномерное, с постоянным ускорением или движение с переменным ускорением.

3. Свободное падение. Движение тела, брошенного под углом к горизонту.

Одним из наиболее распространенных видов движения с постоянным ускорением – свободное падение тел. Каждый из нас наблюдал, что при падении тела на Землю из состояния покоя оно увеличивает свою скорость, т.е. движется с ускорением. Это ускорение сообщает ему земной шар.

Долгое время считалось, что Земля сообщает разным телам различное ускорение. Простые наблюдения как будто это подтверждают, например, птичье перо или лист бумаги падают гораздо медленнее камня.

Аристотель утверждал, что в реальных условиях тела падают с разной скоростью. Он полагал, что чем тяжелее тело, тем быстрее оно падает.

Усомнился в правильности выводов Аристотеля ученый Галилей. Именно Галилей ввел эксперимент, проверяющий гипотезу как обязательный элемент исследования. Именно за использование экспериментального метода его считают основоположником физической науки. Важно учитывать сопротивление воздуха, именно оно искажает картину. Галилей установил, что свободное падение является равноускоренным движением. Согласно легенде, в 1583 году он проводил самые первые опыты по сбрасыванию тяжелых шаров одинакового диаметра с падающей башни высотой 55 метров в итальянском городе Пизе. Чтобы исключить влияние формы, он бросал тела одинаковых размеров, но разных масс. В результате тщательно проведенных опытов и размышлений он сделал вывод: ускорения всех свободно падающих тел одинаковы и постоянны, если пренебречь сопротивлением воздуха.

Вскоре после Галилея были созданы воздушные насосы, позволяющие проводить опыты со свободным падением в вакууме. Именно опыт Ньютона дал решающую проверку предположению Галилея.

*Интересно:* Прост и убедителен опыт, проведённый Ньютоном. В стеклянную трубку помещают различные предметы: дробины, кусочки пробки, пушинки и т.д. Если перевернуть трубку так, чтобы эти предметы могли падать, то быстрее всего упадёт дробишка, за ней - кусочек пробки и наконец плавно опустится пушинка. Но если выкачать из трубки воздух, то мы увидим, что все тела упадут одновременно. Значит, движение пушинки задерживалось ранее сопротивлением воздуха, которое в меньшей степени сказывалось на движении, например, пробки. Когда же на эти тела действует только притяжение к Земле, то все они падают с одним и тем же ускорением.

*Важно:* если пренебречь сопротивлением воздуха, то можно считать, что вблизи поверхности Земли ускорение всех падающих тел одинаково и постоянно.

*Запомни:* Движение тела только под влиянием притяжения его к Земле называют свободным падением, а ускорение, сообщаемое Землёй всем телам, называют ускорением свободного падения. Оно всегда направлено вертикально вниз, т.е. вдоль нити отвеса, определяющей вертикаль. Его принято обозначать

*Важно:* Тела разных масс падают в вакууме с одинаковым ускорением

- Ускорение свободного падения обозначается  $g$
- Ускорение свободного падения всегда направлено к центру Земли
- Ускорение свободного падения зависит от:
  - географической широты местности на поверхности Земли;
  - высоты над Землей; от плотности пород, залегающих в недрах Земли: в районах, где залегают породы, плотность которых больше средней плотности Земли (например, железная руда),  $g$  больше, а там, где имеются залежи нефти,  $g$  меньше (этим пользуются геологи при поиске полезных ископаемых).

Ускорение свободного падения на Земле принимают приблизительно  $g = 9,8$  (для грубых расчетов  $g=10$ ).

В условиях Земли падение тел считается условно свободным, т.к. при падении тела в воздушной среде всегда возникает еще и сила сопротивления воздуха. Идеальное свободное падение возможно лишь в вакууме, где нет силы сопротивления воздуха, и независимо от массы, плотности и формы все тела падают одинаково быстро, т. е. в любой момент времени тела имеют одинаковые мгновенные скорости и ускорения.

Свободное падение - это не обязательно движение вниз. Если начальная скорость направлена вверх, то тело при свободном падении некоторое время будет лететь вверх, уменьшая свою скорость до нуля, и лишь затем начнет падать.

При падении тел в воздухе на их движение влияет сопротивление воздуха. Поэтому ускорение тел не равно. Но когда движутся такие тела, как камень, спортивное ядро и т.д., сопротивление воздуха влияет на их движение незначительно. В этом случае движение тел можно рассматривать как свободное падение. Лишь при больших скоростях (снаряд, пуля и т.д.) сопротивление воздуха становится существенным. Для лёгких тел типа пушинки сопротивление воздуха существенно и при малых скоростях.

С движением тел, получивших начальную скорость под углом к ускорению свободного падения или под углом к горизонту, приходится встречаться довольно часто.

**Закон независимости движений:** всякое сложное движение можно представить как сумму движений по двум независимым координатам.

Теперь выясним, какой будет траектория движения тела, если его начальная скорость направлена горизонтально. Из рисунка слева видно, что начиная с того момента, когда скорость тела горизонтальна, оно движется по ветви параболы. Следовательно, любое тело, брошенное горизонтально, будет двигаться по одной из ветвей параболы, вершина которой находится в точке бросания. Мы разобрали пример сложного движения тела. Это движение является суммой двух независимых движений – равномерного движения со скоростью и равноускоренного движения с ускорением. Используя закон независимости движения в разные моменты времени.

*Интересно:* Наглядное представление о траектории тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, можно получить на простом опыте. Так как каждая частица воды движется по параболе, то струи воды имеют форму параболы. В этом легко убедиться, поставив за струёй экран с заранее вычерченной параболой. При определённой скорости истечения воды струя будет располагаться вдоль вычерченной параболы.

#### 4. Равномерное движение по окружности.

В окружающей жизни и технике очень распространены криволинейные движения. Поезд на закруглении пути, автомашина на повороте совершают криволинейное движение. В прямолинейном движении вектор скорости совпадает с направлением движения. В криволинейном движении в каждой точке траектории этого движения скорость направлена по касательной к этой траектории. Из этого следует, что направление скорости изменяется в каждой точке траектории или, иначе говоря, в каждый момент времени. Если тело в каждой точке траектории движется неравномерно, то скорость будет изменяться не только по направлению, но и по величине. Быстроту изменения скорости характеризует ускорение. Среди различных видов криволинейного движения особый интерес представляет равномерное движение по окружности. Это самый простой вид криволинейного движения. Вместе с тем любое сложное движение тела на достаточно малом участке его траектории можно приближённо рассматривать как равномерное движение по окружности.

*Интересно:* Движение тела по окружности или дуге довольно часто встречается в природе и технике. Приблизительно по окружности движется Луна вокруг Земли; каждая точка земной поверхности движется по окружности вокруг земной оси; дуги окружности описывают различные точки самолёта во время виража, автомобиля при повороте, поезда на закруглении дороги и т.д.

При равномерном движении по окружности скорость меняется лишь по направлению, модуль же ее остается неизменным. Именно поэтому такое движение и называют равномерным. Но это вовсе не означает, что ускорение при этом равно нулю. Равномерное движение по окружности происходит с ускорением, направленным в каждой точке этой окружности к ее центру и потому называемым центростремительным.

*Интересно:* иногда центростремительное ускорение называют нормальным ускорением. Это название связано с тем, что центростремительное ускорение направлено по нормали к скорости тела.

**Важно:** В процессе движения точки по окружности ускорение всё время направлено по радиусу к центру, т.е. непрерывно изменяется по направлению. Следовательно, равномерное движение точки по окружности является движением с переменным ускорением и переменной скоростью. Модули скорости и ускорения при этом остаются постоянными.

Кроме центростремительного ускорения, важнейшими характеристиками равномерного движения по окружности являются период и частота обращения.

Период обращения - это время, за которое тело совершает один оборот. Обозначается период буквой  $T$ .

Частота обращения — это величина, численно равная числу оборотов, совершенных за единицу времени. Обозначается частота греческой буквой  $\nu$ .

**Запомни:** Вращательное движение абсолютно твёрдого тела вокруг неподвижной оси – это такое его движение, при котором все точки тела описывают окружности, центры которых находятся на одной прямой, называемой осью вращения, при этом плоскости, которым принадлежат эти окружности, перпендикулярны оси вращения.

Абсолютно твёрдое тело = это одна из механических моделей, используемых при описании движения и взаимодействия тел.

**Запомни:** абсолютно твёрдое тело - это тело, расстояние между любыми двумя точками которого остаётся постоянным при его движении.

Угловая скорость тела при равномерном движении - это физическая величина, равная отношению угла поворота тела к промежутку времени, за который этот поворот произошёл. Полному повороту тела соответствует угол

**Важно:** при вращении абсолютно твердого тела разные его точки имеют неодинаковые линейные скорости, но угловая скорость для всех точек одинакова.



Практические занятия:

1. Относительность механического движения. Зависимость траектории от выбора системы отсчета.

2. Виды механического движения, его характеристики.

Самостоятельные работы:

Тема 1 «Скорость света. Экспериментальные основы специальной теории относительности.

Постулаты Эйнштейна».

Тема 2 «Относительность одновременности событий. Относительность понятий длины и промежутка времени».

Задания для самостоятельного выполнения

1. Проработка конспекта

Форма контроля самостоятельной работы: устный опрос, проверка решений задач.

Вопросы для самоконтроля по теме:

1. Что называется механикой? Какие разделы она включает? В чём их отличие?

2. Что называется системой отсчёта? Что значит выбрать систему отсчёта? Какое тело называется телом отсчёта? Для чего необходимо выбрать систему координат?

3. Что называют механическим движением? Что означает относительность движения? Привести пример.

4. Что называют материальной точкой? Приведите пример.

5. Что такое вектор перемещения? Что он характеризует? Как обозначают малые перемещение?

6. Что такое траектория? Что означает, что траектория относительна? Существует ли понятие траектории для микрочастиц? Почему?

7. Что такое пройденный путь? Может ли пройденный путь совпадать с модулем вектора перемещения?

8. Что такое ускорение? Что показывает модуль ускорения?

9. Какие виды движения существуют? Дайте определение каждому виду.

10. Какие формулы описывают равномерное прямолинейное движение? Какие формулы описывают ускоренное движение?

11. Какую форму имеет траектория тела, брошенного под углом к горизонту?

12. При каком угле бросания дальность полета будет максимальна?

Под каким углом к горизонту направлена скорость тела в наивысшей и конечной точках траектории?

## Тема 1.2. Законы динамики Ньютона. Закон всемирного тяготения.

**Динамика** – раздел механики, в котором изучают закономерности механического движения материальных тел под действием приложенных к ним сил и причины возникновения у тел ускорений.

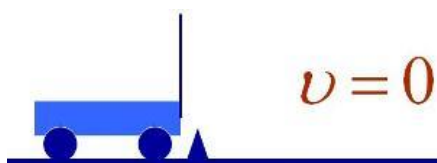
**Основная задача динамики** состоит в том, чтобы по известным законам движения определить силы, действующие на тело.

Изменение скорости тела происходит под действием другого тела. Покажем это.

Опыт с тележками. К тележке прикрепим упругую пластинку. Затем изогнем ее и свяжем нитью. Тележка относительно стола находится в покое.



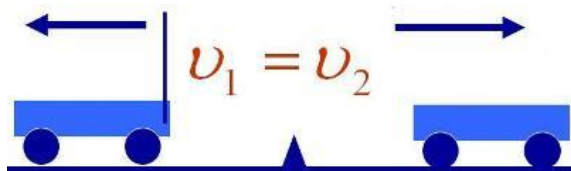
Станет ли двигаться тележка, если упругая пластинка выпрямится? Для этого перережем нить. Пластинка выпрямится. Тележка же останется на прежнем месте.



Затем вплотную к согнутой пластинке поставим еще одну такую же тележку.



Вновь пережжем нить. После этого обе тележки приходят в движение относительно стола. Они разъезжаются в разные стороны.

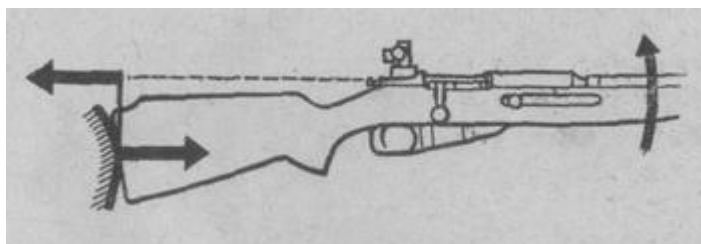
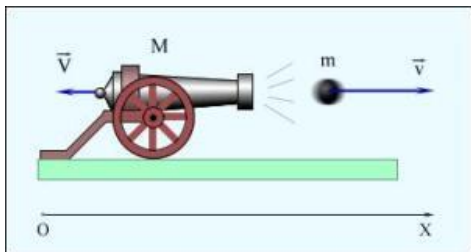


Чтобы изменить скорость тележки, понадобилось второе тело. Опыт показал, что **скорость тела меняется только в результате действия на него другого тела** (второй тележки). В нашем опыте мы наблюдали, что в движение пришла и вторая тележка. Обе стали двигаться относительно стола.

Тележки действуют друг на друга, т.е они **взаимодействуют**. Значит, действие одного тела на другое не может быть односторонним, оба тела действуют друг на друга, т. е. взаимодействуют.

*Действие тел друг на друга называют **взаимодействием**.*

Пуля также находится в покое относительно ружья перед выстрелом. При взаимодействии (во время выстрела) пуля и ружье движутся в разные стороны. Получается явление - отдачи.



Если человек, сидящий в лодке, отталкивает от себя другую лодку, то происходит взаимодействие. Обе лодки приходят в движение.



Если человек прыгает с лодки на берег, то лодка отходит в сторону, противоположную прыжку. Человек подействовал на лодку. В свою очередь, и лодка действует на человека. Он приобретает скорость, которая направлена к берегу.



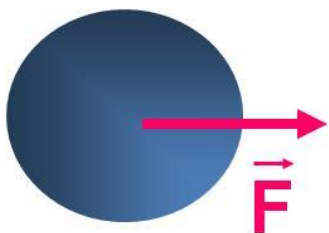
Итак, **в результате взаимодействия оба тела могут изменить свою скорость**. В повседневной жизни мы постоянно встречаемся с различными видами воздействий одних тел на другие. Чтобы открыть дверь, нужно «подействовать» на нее рукой, от воздействия ноги мяч летит в ворота, даже присаживаясь на стул, вы действуете на него. В то же время, открывая дверь, мы ощущаем ее воздействие на нашу руку, действие мяча на ногу особенно ощутимо, если вы играете в футбол босиком, а действие стула не позволяет нам упасть на пол. То есть действие всегда является взаимодействием: если одно тело действует на другое, то и другое тело действует на первое. Эти примеры подтверждают вывод ученых о том, что в природе мы всегда имеем дело с взаимодействием, а не с односторонним действием.

Величину, характеризующую взаимодействие тел, называют сила.

**Сила** — физическая величина, которая количественно характеризует действие одного тела на другое.

**Сила** – векторная величина; она характеризуется:

- модулем (абсолютной величиной);
- направлением;
- точкой приложения.



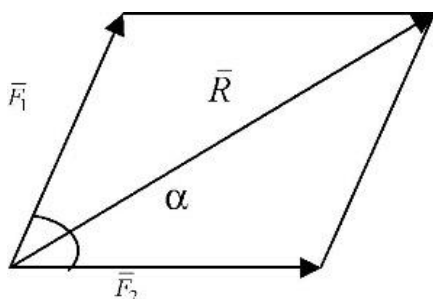
Измеряется при помощи прибора «динамометр». Простейший динамометр состоит из пружины с двумя крючками, закрепленной на дощечке. На дощечку нанесена шкала.



Единица измерения силы в Международной системе единиц (СИ) - *Ньютон*, обозначение [Н].

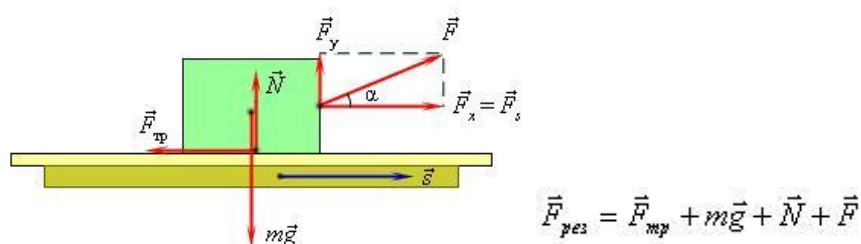
Если на тело одновременно действуют несколько сил (например,  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ ) то под силой, действующей на тело, нужно понимать **равнодействующую всех сил**:  $F = F_1 + F_2 + F_3$

**Равнодействующая сил** – это сила, действие которой заменяет действие всех сил, приложенных к телу. Это векторная сумма этих сил, приложенных к телу.

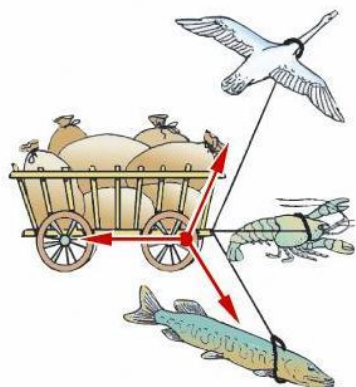


**Принцип суперпозиции сил**: если тело взаимодействует одновременно с несколькими телами, то **резльтирующая сила**, действующая на данное тело, **равна векторной сумме сил**, действующих на это тело со стороны всех других тел.

Для тела, движущегося по поверхности:



В басне Крылова "Лебедь, рак и щука" они не могли сдвинуть телегу, т.к. равнодействующая сил, приложенных к телеге была равна нулю.



Основу динамики составляют три закона Ньютона, которые справедливы для макроскопических тел, скорость движения которых много меньше скорости движения света в вакууме.

**Первый закон Ньютона** - Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела (или действие других тел скомпенсировано).

$$R=0; v=const$$

$R$  - равнодействующая всех сил, приложенных к телу

$v$  - скорость тела

Альтернативные формулировки:

1. **Первый закон Ньютона** - если на тело не действует внешняя сила, то тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.
2. **Первый закон Ньютона** - материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного движения до тех пор, пока внешние воздействия не изменят этого состояния.

Первый закон Ньютона – закон инерции. **Инерцией** называют явление сохранения скорости движения тела при отсутствии внешних воздействий или при их компенсации.

### Условия инерции:

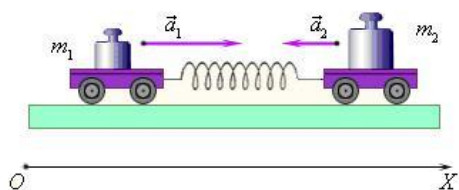
- а) если действия нет ( $R=0$ ) – покой,  $v=0$ ;
- б) если действия скомпенсированы ( $R=0$ ) – движение равномерное прямолинейное ( $v=\text{const}$ )

Системы отсчета, в которых выполняется **Первый закон Ньютона**, называются инерциальными системами отсчета. Все системы отсчета, движущиеся прямолинейно и равномерно относительно данной инерциальной системы отсчета, тоже являются инерциальными.

**Инерциальная система отсчета (ИСО)** – система отсчета относительно которой тело, при отсутствии внешних воздействий или при их компенсации, движется прямолинейно и равномерно.

Явление инерции позволяет определить **массу** тел. Если два тела взаимодействуют между собой, то приобретаемые ими скорости зависят от массы этих тел. Чем тело массивнее, тем меньшую скорость оно приобретает (говорят, что тело **более инертное**). Чем тело менее массивное, тем большую скорость оно приобретает (**менее инертное**). Вспомните, что проще сдвинуть яблоко или арбуз?

Опыт по столкновению двух тележек.



Отношение масс тел при их взаимодействии равно обратному отношению модулей ускорений:

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{a_2}{a_1}$$

*Свойство тела, от которого зависит его ускорение при взаимодействии с другими телами, называется **инертностью**.*

Одни тела более инертны, другие менее инертны (разгон легкового автомобиля и грузового, столкновение пластмассового шарика и стального – у какого шарика будет больше ускорение при столкновении? У пластмассового, т.к. он легче или, как говорят физики, менее инертен)

**Опыт № 1. Инертность тела.** (Объяснение опыта: любое тело старается сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Когда бумажную ленту тянут медленно, то за ней движется колба, если же ленту вырывают быстро она остается на месте, т.е. сохраняет состояние покоя.)

**Опыт № 2. Инертность тела.** (Объяснение опыта: Любое тело старается сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Если медленно двигать подставку, то шарик движется вместе с ней, а если резко выбить подставку шарик остается на месте.)

*Количественная мера инертности тела – масса тела.*

**Масса тела** – это физическая величина, выражающая его инертность.

Любое тело обладает массой. Масса обозначается буквой  $m$ .

Единица измерения массы в СИ – **1 килограмм [ кг ]**.

Килограмм - это масса эталона. Эталон килограмма находится в городе Севре около Парижа.



Измеряется масса с помощью весов (взвешиванием) и по ускорению при взаимодействии с эталоном.



**Второй закон Ньютона** — Ускорение тела пропорционально силе, действующей на тело и обратнопропорционально массе этого тела.

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

$F$  — Сила действующая на тело

$m$  — Масса тела

$a$  — Ускорение тела

Альтернативная формулировка:

**Второй закон Ньютона** — Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение

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

Закон справедлив для любых сил

Из Второго закона Ньютона следует :



- приложенная к телу сила определяет его ускорение;

- сила – причина изменения движения (скорости);

Ускорение, приобретаемое материальной точкой в инерциальной системе отсчета:

- Прямо пропорционально действующей на точку силе;

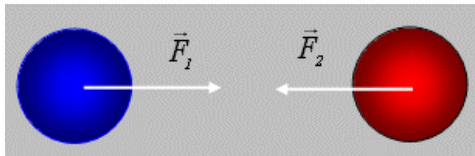
- Обратно пропорционально массе точки;

- направление ускорения всегда совпадает с направлением силы;

Если на тело одновременно действуют несколько сил (например,  $F_1, F_2$  и  $F_3$ ) то под силой в формуле, выражающей второй закон Ньютона, нужно понимать равнодействующую всех сил:  $F = F_1 + F_2 + F_3$

**Третий закон Ньютона** - Тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



$F_2$  — Сила действующая на 2 предмет

$F_1$  — Сила действующая на 1 предмет

Эти Силы :

- действуют вдоль одной прямой;

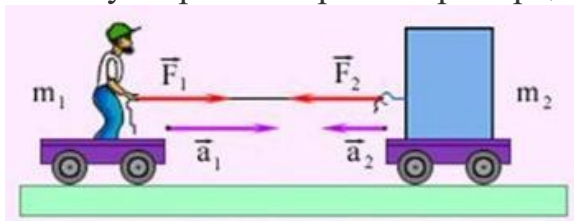
- направлены в противоположные стороны;

- равны по величине;

- приложены к разным телам, поэтому не уравнивают друг друга;

- одинаковой природы.

На картинке показан как действует **третий закон Ньютона**. Человек воздействует на груз с такой же по модулю силой, с какой груз действует на человека. Эти силы направлены в противоположные стороны. Они имеют одну и ту же физическую природу – это упругие силы каната. Сообщаемые обоим телам ускорения обратно пропорциональны массам тел.



Третий закон выполняется во всех случаях при взаимодействии тел. Силы взаимодействия имеют одинаковую природу.

В природе существуют различные силы.

**Гравитационные силы** действуют между всеми телами – все тела притягиваются друг к другу. Но это притяжение существенно лишь тогда,



когда хотя бы одно из взаимодействующих сил так же велико, как Земля или луна.

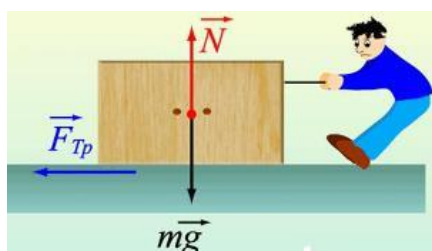
**Электромагнитные силы** действуют между заряженными частицами. В атомах, молекулах, живых организмах именно они являются главными.

Область **ядерных сил** очень ограничена. Они заметны только внутри атомных ядер (т.е. на расстоянии  $10^{-12}$  см.)

**Слабые взаимодействия** проявляются на ещё меньших расстояниях. Они вызывают превращение элементарных частиц друг в друга.

**Основные виды сил:** сила тяжести, сила трения, сила упругости.

1. При соприкосновении двух движущихся тел возникает сила, направленная против движения и препятствующая движению - сила трения.



**Сила трения** - это сила, возникающая при движении одного тела по поверхности другого, приложенная к движущемуся телу и направлена против движения.

Сила трения - это сила **электромагнитной природы**.

Возникновение силы трения объясняется **двумя причинами**:

- 1) Шероховатостью поверхностей
- 2) Проявлением сил молекулярного взаимодействия.

Силы трения всегда направлены по касательной к соприкасающимся поверхностям и **подразделяются** на *силы трения покоя, силы трения скольжения, силы трения качения*.

$F_{тр} = m \cdot N$ , где  $m$  – коэффициент трения,  $N$  – сила реакции опоры.

2. **Сила упругости** – сила, которая возникает при любом виде деформации тел и стремится вернуть тело в первоначальное состояние.

$F_{упр_x} = -k \cdot x$ , где  $k$  – жесткость тела [Н/м],  $x$  - абсолютное удлинение тела.

Сила упругости перпендикулярна поверхности взаимодействующих тел и направлена всегда против деформации.

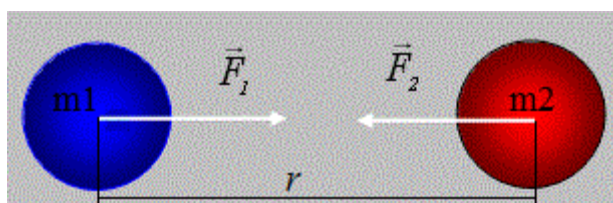
3. Почему мяч, выпущенный из рук, падает вниз? Почему прыгнувший вверх человек вскоре снова оказывается внизу? У этих явлений одна и та же причина – притяжение Земли. Наблюдения за природными объектами показывают, что все окружающие тела ощущают притяжение к Земле. Падает вниз вода фонтанов, водопадов и листья деревьев.

**Сила тяжести** – сила, с которой тела притягиваются к Земле, сила притяжения тел к Земле.

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot g$$

Сила тяжести всегда направлена вертикально вниз к поверхности Земли. Сила тяжести направлена к центру Земли. *Сила тяжести это гравитационная сила, приложенная к центру тела.*

Сила тяжести – одно из проявлений силы всемирного тяготения. Закон всемирного тяготения был открыт И. Ньютоном в 1682 году. Еще в 1665 году 23-летний Ньютон высказал предположение, что силы, удерживающие Луну на ее орбите, той же природы, что и силы, заставляющие яблоко падать на Землю. По его гипотезе между всеми телами Вселенной действуют силы притяжения (гравитационные силы), направленные по линии, соединяющей центры масс. У тела в виде однородного шара центр масс совпадает с центром шара.



**Закон всемирного тяготения.** Все тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратнопропорционален квадрату расстояния между ними.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \text{ - закон всемирного тяготения.}$$

G – постоянная всемирного тяготения или гравитационная постоянная.

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

Многие явления в природе объясняются действием сил всемирного тяготения. Движение планет в Солнечной системе, движение искусственных спутников Земли, траектории полета баллистических ракет, движение тел вблизи поверхности Земли – все эти явления находят объяснение на основе закона всемирного тяготения и законов динамики.

Одним из проявлений силы всемирного тяготения является **сила тяжести**. Так принято называть *силу притяжения тел к Земле вблизи ее поверхности*.

Обозначим M – масса Земли; m – масса тела; R – радиус Земли, тогда сила тяготения

$$F = G \frac{M \cdot m}{R^2} = mg \text{ - сила тяжести.}$$

m - масса тела

$g$  – ускорение свободного падения.

Сила тяжести направлена к центру Земли. *Сила тяжести - это гравитационная сила, приложенная к центру тела.*

Из закона Всемирного тяготения:  $g = \frac{F}{m} = \frac{GMm}{R^2m} = \frac{GM}{R^2}$ , где  $M$  - масса планеты,  $m$  - масса тела,  $R$  - расстояние до центра планеты;  $g$  - ускорение силы тяжести. Значит  $g$  не зависит от массы тела. В отсутствии других сил тело свободно падает на Землю с ускорением свободного падения.

**$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – среднее значение ускорения свободного падения для различных точек поверхности Земли.**

На высоте  $h$  ускорение свободного падения равно  $g = \frac{GM}{(R+h)^2}$

При удалении от поверхности Земли сила земного тяготения и ускорение свободного падения изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния  $r$  до центра Земли.

**Силу тяжести** с которой тела притягиваются к Земле, нужно отличать от веса тела. В отличие от силы тяжести, являющейся гравитационной силой, приложенной к телу, **вес** – это упругая сила, приложенная к опоре или подвесу (т.е. к связи).

**Вес тела** – это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или подвес.

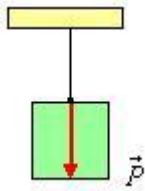
При этом предполагается, что тело **неподвижно относительно опоры или подвеса**.

Пусть тело лежит на неподвижном относительно Земли горизонтальном столе. Систему отсчета, связанную с Землей, будем считать **инерциальной**. На тело действуют сила тяжести  $F_m = mg$ , направленная вертикально вниз, и сила упругости  $F_{упр} = N$ , с которой опора действует на тело. Силу  $N$  называют **силой нормального давления** или **силой реакции опоры**.

Силы, действующие на тело, уравновешивают друг друга:  $F_m = -F_{упр} = -N$ .

В соответствии с третьим законом Ньютона тело действует на опору с некоторой силой  $P$ , равной по модулю силе реакции опоры и направленной в противоположную сторону:  $P = -N$ . По определению, сила  $P$  и называется весом тела. Из приведенных выше соотношений видно, что  $P = F_m = mg$ , то есть вес тела равен силе тяжести. **Но эти силы приложены к разным телам!**

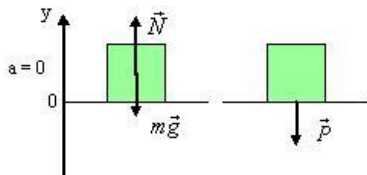
Если тело неподвижно висит на пружине, то роль силы реакции опоры (подвеса) играет упругая сила пружины.



По растяжению пружины можно определить вес тела и равную ему силу притяжения тела Землей. Для определения веса тела можно использовать также **рычажные весы**, сравнивая вес данного тела с весом гирь на равноплечем рычаге. Приводя в равновесие рычажные весы путем уравнивая веса тела суммарным весом гирь, мы одновременно достигаем равенства массы тела суммарной массе гирь, независимо от значения ускорения свободного падения в данной точке земной поверхности.

### Вес тела в различных условиях движения.

1. опора покоится или движется равномерно

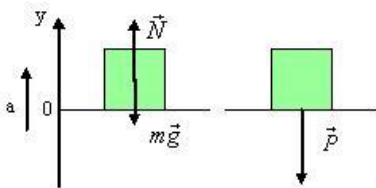


$N = mg$  – сила реакции опоры равна силе тяжести.

$P = N$  значит  $P = mg$

**Вес тела равен действующей на тело силе тяжести.**

2. опора движется с ускорением  $a$  вверх.



$N - mg = ma$  - второй закон Ньютона

$N = mg + ma$

$P = N = m(g + a)$

$P > mg$

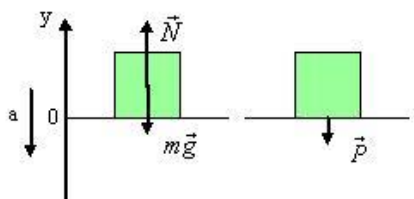
**Вес тела, движущегося с ускорением направленным вверх больше силы тяжести.**

Увеличение веса тела, вызванное его ускоренным движением, называется **перегрузкой**.

Действие перегрузки испытывают космонавты, как при взлете космической ракеты, так и на участке торможения при входе корабля в плотные слои

атмосферы. Большие перегрузки испытывают летчики при выполнении фигур высшего пилотажа, особенно на сверхзвуковых самолетах.

3. опора движется с ускорением  $a$  вниз.



$mg - N = ma$  - второй закон Ньютона

$$N = mg - ma$$

$$P = N = m(g - a)$$

$$P < mg$$

**Вес тела, движущегося с ускорением вниз уменьшается.**

*Падение тел в вакууме без начальной скорости называется **свободным падением**. При свободном падении  $a=g$  из  $P=m(g - g)$  следует, что  $P = 0$ , т.е. вес отсутствует.*

*Если тела движутся только под действием силы тяжести, т.е. свободно падают, то они находятся в состоянии **невесомости**. Оно возникает, например, в кабине космического корабля при его движении по орбите с выключенными реактивными двигателями.*

Практические занятия:

Законы Ньютона.

Задания для самостоятельного выполнения

1. Проработка конспекта

Форма контроля самостоятельной работы: устный опрос, проверка решений задач.

Вопросы для самоконтроля по теме:

1. Какие системы отсчёта являются инерциальными, а какие – неинерциальными? Приведите примеры таких систем. Может ли считать инерциальными системами отсчета, неподвижно

связанные Землёй?

2. Сформулируйте первый закон Ньютона. В чем состоит явление инерции?

3. Как направлено ускорение тела, вызванное действующей на него силой. Верно ли утверждение – силы есть, а ускорения нет. Если на тело действует несколько сил, как определяется равнодействующая сил? Запишите второй закон Ньютона.

4. Сформулируйте третий закон Ньютона. Как направлены силы взаимодействия? Выполняется ли третий закон Ньютона при взаимодействии на расстоянии или только путём непосредственного контакта?

5. Что называется силой всемирного тяготения? сформулируйте закон всемирного тяготения. В чем заключается физический смысл гравитационной постоянной?

### Раздел 3. Строение вещества. Молекулярная физика.

*Молекулярная физика – раздел физики, в котором изучаются физические свойства тел в различных агрегатных состояниях на основе рассмотрения их молекулярного строения, силы взаимодействия между частицами, образующими тела и характеры теплового движения этих частиц.*

Многочисленные исследования, проведенные этими учеными, позволили сформулировать основные положения молекулярно-кинетической теории – МКТ.

МКТ объясняет строение и свойства тел на основе закономерностей движения и взаимодействия молекул, из которых состоят тела.

В основе МКТ лежат три важных положения, подтвержденные экспериментально и теоретически.

1. Все тела состоят из мельчайших частиц – атомов, молекул, в состав которых входят еще более мелкие элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны). Строение любого вещества дискретно (прерывисто).
2. Атомы и молекулы вещества всегда находятся в непрерывном хаотическом движении.
3. Между частицами любого вещества существуют силы взаимодействия – притяжения и отталкивания. Природа этих сил электромагнитная.

Эти положения подтверждаются опытным путем.

Опытное обоснование 1 положения.

Все тела состоят из мельчайших частиц. Во-первых, об этом говорит возможность деления вещества (все тела можно разделить на части).

Наиболее ярким экспериментальным подтверждением представлений молекулярно-кинетической теории о беспорядочном движении атомов и молекул является броуновское движение.

Оно было открыто английским ботаником Р. Броуном (1827 г.). В 1827 году англ. ботаник Броун, изучая внутреннее строение растений с помощью микроскопа обнаружил, что частички твердого вещества в жидкой среде совершают непрерывное хаотическое движение.

*Тепловое движение взвешенных в жидкости (или газе) частиц получило название броуновского движения.*

Броуновские частицы движутся под влиянием беспорядочных ударов молекул. Из-за хаотического теплового движения молекул эти удары никогда не уравнивают друг друга. В результате скорость броуновской частицы беспорядочно меняется по модулю и направлению, а ее траектория представляет собой сложную зигзагообразную кривую. Теория броуновского движения была создана А. Эйнштейном (1905 г.). Экспериментально теория Эйнштейна была подтверждена в опытах французского физика Ж. Перрена (1908–1911 гг.).

Причиной броуновского движения является непрерывное хаотическое движение молекул жидкости или газа, которые беспорядочно ударяясь со всех сторон о частичку, приводят её в движение. *Причина броуновского движения частицы в том, что удары молекул о неё не компенсируются.* Значит броуновское движение является еще и опытным обоснованием 2 положения МКТ.

Непрерывное движение молекул любого вещества (твердого, жидкого, газообразного) подтверждается многочисленными опытами по диффузии.

*Диффузией называют явление самопроизвольного проникновения молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого. Т.е. это самопроизвольное перемешивание веществ.*

Если пахучее вещество (духи) внести в помещение, то через некоторое время запах этого вещества распространится по всему помещению. Это свидетельствует о том, что молекулы одного вещества без воздействия внешних сил проникают в другое. Диффузия наблюдается и в жидкостях, и в твердых телах.

При изучении строения вещества было установлено, что между молекулами одновременно действуют силы притяжения и отталкивания, называемые молекулярными силами. Это силы электромагнитной природы.

Способность твердых тел сопротивляться растяжению, особые свойства поверхности жидкости приводят к выводу, что между молекулами действуют *силы притяжения.*

Малая сжимаемость весьма плотных газов и особенно жидкостей и твердых тел означает, что между молекулами существуют *силы отталкивания.*

Эти силы действуют одновременно. Если бы этого не было, то тела не были бы устойчивыми: либо разлетелись бы на частицы, либо слипались.

*Межмолекулярное взаимодействие* – это взаимодействие электрически нейтральных молекул и атомов.

Силы, действующие между двумя молекулами, зависят от расстояния между ними. Молекулы представляют собой сложные пространственные структуры, содержащие как положительные, так и отрицательные заряды. Если расстояние между молекулами достаточно велико, то преобладают силы межмолекулярного притяжения. На малых расстояниях преобладают силы отталкивания. Зависимости результирующей силы  $F$  и потенциальной энергии  $E$  взаимодействия между молекулами от расстояния между их центрами качественно изображены на рисунке. При некотором расстоянии  $r = r_0$  сила взаимодействия обращается в нуль. Это расстояние условно можно принять за диаметр молекулы. Потенциальная энергия взаимодействия при  $r = r_0$  минимальна. Чтобы удалить друг от друга две молекулы, находящиеся на расстоянии  $r_0$ , нужно сообщить им дополнительную энергию  $E_0$ . Величина  $E_0$  называется глубиной потенциальной ямы или *энергией связи*.

Между электронами одной молекулы и ядрами другой действуют силы притяжения, которые условно принято считать отрицательными (нижняя часть графика). Одновременно между электронами молекул и их ядрами действуют силы отталкивания, которые условно считают положительными (верхняя часть графика). На расстоянии равном размеру молекул результирующая сила равна нулю, т.е. силы притяжения уравновешивают силы отталкивания. Это наиболее устойчивое расположение молекул. При увеличении расстояния притяжение превосходит силу отталкивания, при уменьшении расстояния между молекулами – наоборот.

*Атомы и молекулы взаимодействуют и значит обладают* потенциальной энергией.

*Атомы и молекулы находятся в постоянном движении, и значит, обладают* кинетической энергией.

Масса и размеры молекул

Большинство веществ состоит из молекул, поэтому для объяснения свойств макроскопических объектов, объяснения и предсказания явлений важно знать основные характеристики молекул.

*Молекулой называют наименьшую устойчивую частицу данного вещества, обладающую его основными химическими свойствами.*

Молекула состоит из ещё более мелких частиц – атомов, которые в свою очередь, состоят из электронов и ядер.

*Атомом называют наименьшую частицу данного химического элемента.*

Размеры молекул очень малы.

*Порядок величины диаметра молекулы  $1 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$*



Порядок величины объёма молекулы  $1 \cdot 10^{-20} \text{ м}^3$

О том что размеры молекул малы можно судить и из опыта. В 1 л ( $\text{м}^3$ ) чистой воды разведем  $1 \text{ м}^3$  зеленых чернил, т.е. разбавим чернила в 1 000 000 раз. Увидим, что раствор имеет зеленую окраску и вместе с тем однороден. Это говорит о том, что даже при разбавлении в 1 000 000 раз в воде находится большое количество молекул красящего вещества. Этот опыт показывает, как малы размеры молекул.

В  $1 \text{ см}^3$  воды содержится  $3,7 \cdot 10^8$  молекул.

Порядок величины массы молекул  $1 \cdot 10^{-23} \text{ г} = 1 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$

В молекулярной физике принято характеризовать массы атомов и молекул не их абсолютными значениями (в кг), а относительными безразмерными величинами относительной атомной массой и относительной молекулярной массой.

По международному соглашению в качестве единичной атомной массы  $m_0$  принимается  $1/12$  массы изотопа углерода  $^{12}\text{C}$  ( $m_{0\text{C}}$ ):

$$m_0 = 1/12 m_{0\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27}$$

Относительную молекулярную массу можно определить, если абсолютное значение массы молекулы ( $m_{\text{мол}}$  в кг) разделить на единичную атомную массу.

$$M_0 = m_{\text{мол}} / 1/12 m_{0\text{C}}$$

Относительная молекулярная (атомарная) масса вещества (из таблицы Менделеева)

$${}^7_{14}\text{N} \text{ Азот} \quad M_{0\text{N}} = 14 \quad M_{0\text{N}_2} = 28$$

Относительное число атомов или молекул, содержащихся в веществе характеризуется физической величиной, называемой количеством вещества.

Количество вещества  $\nu$  – это отношение числа молекул (атомов)  $N$  в данном макроскопическом теле к числу молекул в  $0,012 \text{ кг}$  углерода  $N_A$

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$$

Количество вещества выражают в молях

Один моль – это количество вещества, в котором столько же молекул (атомов), сколько атомов содержится в  $0,012 \text{ кг}$  углерода.

Моль любого вещества содержит одинаковое число молекул. Это число называют постоянной Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

Масса одного моля вещества называется молярной массой.

$$M = m_0 \cdot N_A$$

$$N = \nu \cdot N_A = \frac{m \cdot N_A}{M}$$

Число молекул в данной массе вещества:

Масса вещества (любого количества вещества):  $m = m_0 \cdot N = \nu \cdot N_A \cdot m_0 = \nu \cdot M$

Определение молярной массы:  $M = M_0 \cdot 10^{-3} \text{ кг / моль}$

Понятие температуры – одно из важнейших в молекулярной физике.

*Температура - это физическая величина, которая характеризует степень нагретости тел.*

*Беспорядочное хаотическое движение молекул называется тепловым движением.*

Кинетическая энергия теплового движения растет с возрастанием температуры. При низких температурах средняя кинетическая энергия молекулы может оказаться небольшой. В этом случае молекулы конденсируются в жидкое или твердое вещество; при этом среднее расстояние между молекулами будет приблизительно равно диаметру молекулы. При повышении температуры средняя кинетическая энергия молекулы становится больше, молекулы разлетаются, и образуется газообразное вещество.

Понятие температуры тесно связано с понятием теплового равновесия. Тела, находящиеся в контакте друг с другом, могут обмениваться энергией. *Энергия, передаваемая одним телом другому при тепловом контакте, называется количеством теплоты.*

Рассмотрим пример. Если положить нагретый металл на лед, то лед начнет плавиться, а металл – охлаждаться до тех пор, пока температуры тел не станут одинаковыми. При контакте между двумя телами разной температуры происходит теплообмен, в результате которого энергия металла уменьшается, а энергия льда увеличивается.

*Энергия при теплообмене всегда передается от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой.* В конце концов, наступает состояние системы тел, при котором теплообмен между телами системы будет отсутствовать. Такое состояние называют тепловым равновесием.

Тепловое равновесие – *это такое состояние системы тел, находящихся в тепловом контакте, при котором не происходит теплопередачи от одного тела к другому, и все макроскопические параметры тел остаются неизменными.*

**Температура** – *это физический параметр, одинаковый для всех тел, находящихся в тепловом равновесии.* Возможность введения понятия температуры следует из опыта и носит название нулевого закона термодинамики.

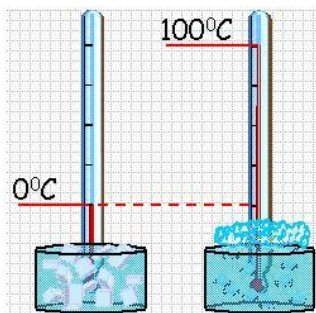
Тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковые температуры.

Для измерения температур чаще всего используют свойство жидкости изменять объем при нагревании (и охлаждении).

*Прибор, с помощью которого измеряется температура, называется термометр.*

Для создания термометра необходимо выбрать термометрическое вещество (например, ртуть, спирт) и термометрическую величину, характеризующую свойство вещества (например, длина ртутного или спиртового столбика). В различных конструкциях термометров используются разнообразные физические свойства вещества (например, изменение линейных размеров твердых тел или изменение электрического сопротивления проводников при нагревании). Термометры должны быть откалиброваны. Для этого их приводят в тепловой контакт с телами, температуры которых считаются заданными. Чаще всего используют простые природные системы, в которых температура остается неизменной, несмотря на теплообмен с окружающей средой – это смесь льда и воды и смесь воды и пара при кипении при нормальном атмосферном давлении.

Обыкновенный жидкостный термометр состоит из небольшого стеклянного резервуара, к которому присоединена стеклянная трубка с узким внутренним каналом. Резервуар и часть трубки наполнены ртутью. Температуру среды, в которую погружен термометр определяют по положению верхнего уровня ртути в трубке. Деления на шкале условились наносить следующим образом. Цифру 0 ставят в том месте шкалы, где устанавливается уровень столбика жидкости, когда термометр опущен в тающий снег (лед), цифру 100 – в том месте, где устанавливается уровень столбика жидкости, когда термометр погружен в пары воды, кипящей при нормальном давлении ( $10^5$  Па). Расстояние между этими отметками делят на 100 равных частей, называемых градусами. Такой способ деления шкалы введен Цельсием. Градус по шкале Цельсия обозначают  $^{\circ}\text{C}$ .



По температурной шкале Цельсия точке плавления льда приписывается температура  $0^{\circ}\text{C}$ , а точке кипения воды –  $100^{\circ}\text{C}$ . Изменение длины столба жидкости в капиллярах термометра на одну сотую длины между отметками  $0^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$  принимается равным  $1^{\circ}\text{C}$ .

В ряде стран (США) широко используется *шкала Фаренгейта* ( $T_F$ ), в которой температура замерзающей воды принимается равной  $32^\circ\text{F}$ , а температура кипения воды равной  $212^\circ\text{F}$ . Следовательно,

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ \text{ или } T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^\circ).$$

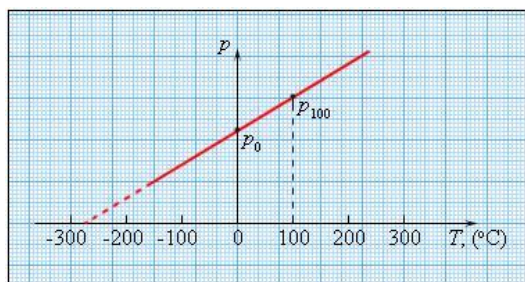
*Ртутные термометры* применяют для измерения температуры в области от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+800^\circ\text{C}$ . Наряду с жидкостными ртутными и спиртовыми термометрами применяются электрические и газовые термометры.

Электрический термометр – термосопротивление – в нем используется зависимость сопротивления металла от температуры.

Особое место в физике занимают *газовые термометр*, в которых термометрическим веществом является разреженный газ (гелий, воздух) в сосуде неизменного объема ( $V = \text{const}$ ), а термометрической величиной – давление газа  $p$ . Опыт показывает, что давление газа (при  $V = \text{const}$ ) растет с ростом температуры, измеренной по шкале Цельсия.



Чтобы проградуировать газовый термометр постоянного объема, можно измерить давление при двух значениях температуры (например,  $0^\circ\text{C}$  и  $100^\circ\text{C}$ ), нанести точки  $p_0$  и  $p_{100}$  на график, а затем провести между ними прямую линию. Используя полученный таким образом калибровочный график, можно определять температуры, соответствующие другим значениям давления.



Газовые термометры громоздки и неудобны для практического применения: они используются в качестве прецизионного стандарта для калибровки других термометров.

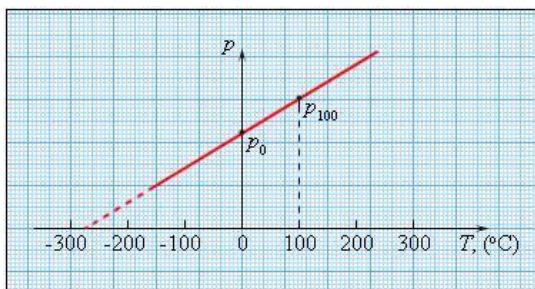
Показания термометров, заполненных различными термометрическими телами, обычно несколько различаются. Чтобы точное определение

температуры не зависело от вещества, заполняющего термометр, вводится *термодинамическая шкала температур*.

Чтобы её ввести, рассмотрим, как зависит давление газа от температуры, когда его масса и объём остаются постоянными.

Термодинамическая шкала температур. Абсолютный нуль.

Возьмем закрытый сосуд с газом, и будем нагревать его, первоначально поместив в тающий лед. Температуру газа  $t$  определим с помощью термометра, а давление  $p$  манометром. С увеличением температуры газа его давление будет возрастать. Такую зависимость нашел французский физик Шарль. График зависимости  $p$  от  $t$ , построенный на основании такого опыта, имеет вид прямой линии.



Если продолжить график в область низких давлений, можно определить некоторую «гипотетическую» температуру, при которой давление газа стало бы равным нулю. Опыт показывает, что эта температура равна  $-273,15$  °C и не зависит от свойств газа. Невозможно на опыте получить путем охлаждения газ в состоянии с нулевым давлением, так как при очень низких температурах все газы переходят в жидкие или твердые состояния. Давление идеального газа определяется ударами хаотически движущихся молекул о стенки сосуда. Значит, уменьшение давления при охлаждении газа объясняется уменьшением средней энергии поступательного движения молекул газа  $E$ ; давление газа будет равно нулю, когда станет равна нулю энергия поступательного движения молекул.

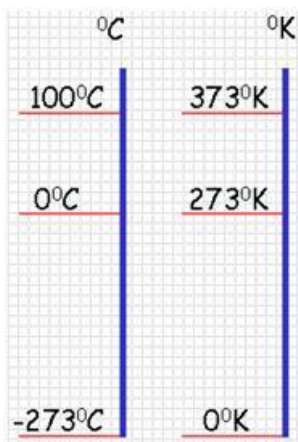
Английский физик У. Кельвин (Томсон) выдвинул идею о том, что полученное значение абсолютного нуля соответствует прекращению поступательного движения молекул всех веществ. *Температуры ниже абсолютного нуля в природе быть не может. Это предельная температура при которой давление идеального газа равно нулю.*

*Температуру, при которой должно прекратиться поступательное движение молекул, называют абсолютным нулем (или нулем Кельвина).*

Кельвин в 1848 г. предложил использовать точку нулевого давления газа для построения новой температурной шкалы – термодинамической шкалы температур (шкала Кельвина). За начало отсчета по этой шкале принята температура абсолютного нуля.

В системе СИ принято единицу измерения температуры по шкале Кельвина называть кельвином и обозначать буквой К.

Размер градуса кельвина определяют так, чтобы он совпадал с градусом Цельсия, т.е.  $1\text{K}$  соответствует  $1^\circ\text{C}$ .



Температура, отсчитанная по термодинамической шкале температур, обозначается  $T$ . Её называют абсолютной температурой или термодинамической температурой.

Температурная шкала Кельвина называется *абсолютной шкалой температур*. Она оказывается наиболее удобной при построении физических теорий.

Кроме точки нулевого давления газа, которая называется *абсолютным нулем температуры*, достаточно принять еще одну фиксированную опорную точку. В шкале Кельвина в качестве такой точки используется температура тройной точки воды ( $0,01^\circ\text{C}$ ), в которой в тепловом равновесии находятся все три фазы – лед, вода и пар. По шкале Кельвина температура тройной точки принимается равной  $273,16\text{ K}$ .

Связь между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия выражается формулой  $T = 273,16 + t$ , где  $t$  – температура в градусах Цельсия.

Чаще пользуются приближенной формулой  $T = 273 + t$  и  $t = T - 273$

Абсолютная температура не может быть отрицательной.

*Температура газа – мера средней кинетической энергии движения молекул.*

В опытах Шарлем была найдена зависимость  $p$  от  $t$ . Эта же зависимость будет и между  $p$  и  $T$ : т.е. *между  $p$  и  $T$  прямопропорциональная зависимость*.

С одной стороны, давление газа прямопропорционально его температуре, с другой стороны, мы уже знаем, что давление газа прямопропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул  $E$  ( $p = 2/3 * E * n$ ). Значит,  $E$  прямопропорциональна  $T$ .



Немецкий ученый Больцман предложил ввести коэффициент пропорциональности  $(3/2)k$  в зависимость  $E$  от  $T$

$$E = (3/2)kT$$

Из этой формулы следует, что *среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекул не зависит от природы газа, а определяется только его температурой.*

Так как  $E = m \cdot v^2/2$ , то  $m \cdot v^2/2 = (3/2)kT$

откуда средняя квадратичная скорость молекул газа

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}}$$

Постоянная величина  $k$  называется постоянной Больцмана.

В СИ она имеет значение  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

Если подставить значение  $E$  в формулу  $p = 2/3 \cdot E \cdot n$ , то получим  $p = 2/3 \cdot (3/2)kT \cdot n$ , сократив, получим  $p = n \cdot k \cdot T$

*Давление газа не зависит от его природы, а определяется только концентрацией молекул  $n$  и температурой газа  $T$ .*

Соотношение  $p = 2/3 \cdot E \cdot n$  устанавливает связь между микроскопическими (значения определяются с помощью расчетов) и макроскопическими (значения можно определить по показаниям приборов) параметрами газа, поэтому его принято называть основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов.

## Раздел 4. Электродинамика

Термин «электродинамика» ввёл в физику французский учёный Андре-Мари Ампер (1775-1836) в 1822 г.

При изучении электродинамики вы познакомитесь с законами взаимодействия тел (частиц), обладающих электрическими зарядами, особенностями упорядоченного движения заряженных частиц, физическими величинами, характеризующими электрические и магнитные поля.

В разделе «Электродинамика» вам предстоит изучить следующие темы: «Электростатика», «Постоянный электрический ток», «Магнитное поле. Электромагнитная индукция» и «Электрический ток в различных средах».

Все известные физические явления связаны с тем или иным взаимодействием тел или частиц. Например, движение Луны вокруг Земли, падение тел на поверхность Земли, отклонение отвеса от вертикального направления вблизи

массивной горы обусловлены гравитационным взаимодействием этих тел. Гравитационному взаимодействию подвержены все тела, однако заметным оно становится только тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих тел обладает достаточно большой массой.

Молекулы любого вещества также участвуют во взаимном притяжении, обусловленном силами всемирного тяготения. Но поскольку массы молекул очень малы, этим взаимодействием обычно пренебрегают. Притяжение и отталкивание молекул, обеспечивающие существование твёрдых и жидких тел, имеют совсем другую природу — электромагнитную.

Электромагнитное взаимодействие осуществляется посредством особого вида материи — электромагнитного поля — совокупности двух взаимосвязанных полей: электрического и магнитного.

Электромагнитное взаимодействие проявляется во всех электрических, магнитных и оптических явлениях. Благодаря ему вы видите окружающий мир, так как свет — одно из проявлений электромагнитного поля. Этим же взаимодействием обусловлены силы упругости и силы трения, известные вам из механики. Электромагнитное взаимодействие определяет свойства веществ в различных агрегатных состояниях и их химические превращения. Поскольку молекулярные силы электромагнитные по природе, то практически все биологические явления обусловлены электромагнетизмом.

**Электростатика — раздел электродинамики, в котором изучают взаимодействие неподвижных в некоторой инерциальной системе отсчёта электрически заряженных тел, распределение заряда на которых не изменяется со временем, а также электростатические поля, создаваемые зарядами таких тел.**

Термин «электростатика» введён Ампером в 1822 г.

Фундаментом электростатики являются экспериментальные научные факты, отражающие поведение заряженных тел при их электрическом взаимодействии. Ядро электростатики составляют закон сохранения электрического заряда, опытным путём установленный в 1759 г. петербургским академиком Францем Эпинусом (1724—1802), и закон взаимодействия покоящихся точечных зарядов, экспериментально открытый в 1785 г. французским учёным Шарлем Кулоном (1736-1806).

**Электрический заряд и закон сохранения электрического заряда**

Что означает наличие электрического заряда у тела или частицы? Как взаимодействуют электрически заряженные тела?

О том, что янтарь, потёртый о шерсть, приобретает свойство притягивать лёгкие предметы (рис. 94), знали ещё древние греки. Однако только в 1600 г. лейб-медик королевы Англии доктор медицины Уильям Гильберт в книге «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле» дал первое



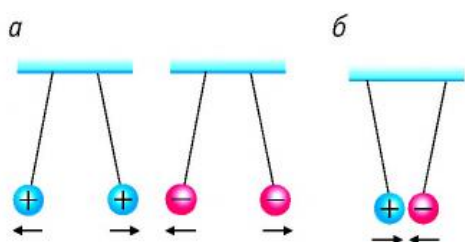
систематизированное описание свойств электрических и магнитных материалов. Гильберт продемонстрировал, что кроме янтаря свойством притягивать лёгкие предметы обладают после натирания алмаз, сера, фарфор и многие другие тела. Он назвал их «электрическими» (



**Электрический заряд** — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц).

Электрический заряд, как и масса, не существует без тела или частицы, а заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему.

Существуют два вида электрических зарядов, которые условились называть положительными и отрицательными. Причём при взаимодействии одноимённо заряженные тела (частицы) отталкиваются друг друга (рис. 95, а), а разноимённо заряженные — притягиваются друг друга (рис. 95, б).



Заряды разных тел (частиц) могут отличаться не только знаками, но и числовыми значениями.

За единицу электрического заряда в СИ принят кулон (Кл). Эта единица названа в честь Шарля Кулона (1736—1806). 1 Кл — величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за промежуток времени 1 с при силе постоянного тока 1 А.

### **Интересно знать:**

Один кулон — очень большая величина заряда. Расчёты показывают, что на удалённом от всех остальных тел металлическом шаре, находящемся в сухом воздухе, может находиться избыточный заряд 1 Кл, если его диаметр не менее 110 м. Вместе с тем при включении автомобильных фар сила тока в цепи приблизительно 10 А, т. е. каждую секунду через поперечное сечение проводников, подсоединённых к фарам, проходит заряд приблизительно 10 Кл.

На рубеже XIX и XX столетий учёные экспериментально установили, что в природе существует электрический заряд, модуль которого минимален. Этот заряд назвали элементарным. Вы знаете, что ядра всех атомов содержат протоны, которые являются носителями положительного элементарного заряда, а сами атомы содержат электроны, являющиеся носителями отрицательного элементарного заряда. Учёные с точностью

порядка  $\sim 10^{-20}$  установили равенство модулей зарядов электрона и протона.

Модуль элементарного электрического

заряда  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл. Обычно ограничиваются двумя

значащими цифрами  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Электроны, протоны и нейтроны входят в состав всех тел, так как из них состоят атомы и молекулы любого вещества\*. В электрически нейтральном теле алгебраическая сумма зарядов всех частиц равна нулю. Если каким-нибудь образом создать в таком теле избыток зарядов одного знака, то оно окажется заряженным. Заряд тела  $q$  образуется совокупностью элементарных зарядов и всегда кратен элементарному заряду  $e$  (электрический заряд дискретен):

$$q = e(N_p - N_e),$$

где  $N_p$  и  $N_e$  — числа протонов и электронов в данном теле.

Например, тело, заряд которого  $q_1 = 5e$ , отличается от нейтрального тела недостатком пяти электронов, а тело, заряд которого  $q_2 = -13e$ , — избытком тринадцати электронов.

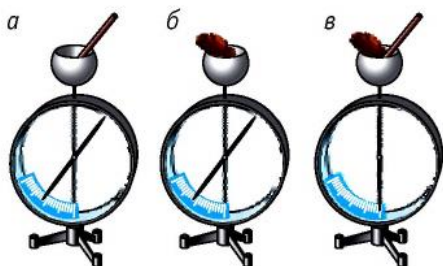
### Интересно знать:

В одном моле вещества ( $\sim 6 \cdot 10^{23}$  молекул) заряженного тела обычно содержится относительно небольшое количество электронов (до  $\sim 1 \cdot 10^{10}$ ), избыточных или недостающих по сравнению с числом протонов. Так как масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, то это вызывает изменение массы одного моля заряженного тела не более чем на  $9 \cdot 10^{-31}$  кг  $\cdot 1 \cdot 10^{10} = 9 \cdot 10^{-21}$  кг по сравнению с массой нейтрального тела. Такое изменение массы, конечно, можно не учитывать.

### Закон сохранения электрического заряда:

Вы знаете, что при трении соприкасающиеся тела электризуются, при этом модули противоположных по знаку зарядов, возникших на телах, равны.

Проверим это на опыте. Наэлектризуем трением соприкасающиеся друг с другом эбонитовую палочку и кусочек меха или шерстяной ткани.



Поместим поочерёдно внутрь металлической сферы, укреплённой на стержне электрометра, эбонитовую палочку (рис. 96, а) и кусочек меха (рис. 96, б). Стрелка электрометра отклонится, причём, как в первом, так и во втором случаях, на одинаковые углы. Если же одновременно опустить внутрь сферы эбонитовую палочку и кусочек меха (рис. 96, в), то стрелка электрометра останется на месте. Следовательно, модули зарядов обоих тел равны, а их знаки противоположны.

\* Исключением является водород, у которого ядра атомов — протоны.

Результаты многочисленных экспериментов позволили сформулировать утверждение, которое является фундаментальным законом природы — **законом сохранения электрического заряда: в электрически изолированной системе при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной:**

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

где  $n$  — число зарядов в системе.

Принято считать систему тел (частиц) электрически изолированной, если между ней и внешними телами нет обмена электрически заряженными частицами.

Закон сохранения электрического заряда указывает на важную особенность электрических явлений: электрические заряды всегда появляются парами. Так, например, при электризации трением тела приобретают заряды противоположных знаков, модули которых одинаковые.

### **Из истории физики:**

Закон сохранения электрического заряда впервые был сформулирован и экспериментально подтверждён М. Фарадеем в 1843 г.

### **Взаимодействие точечных зарядов и закон Кулона**

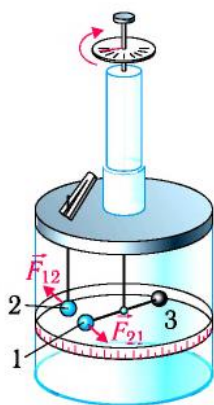
Электрически заряженные тела (частицы) взаимодействуют друг с другом. Но как определить силу, которой одно заряженное тело притягивает или отталкивает другое?

Вы уже встречались с физическими моделями при изучении механики (материальная точка) и молекулярной физики (идеальный газ). В электростатике при изучении взаимодействия электрически заряженных тел эффективной оказывается модель «точечный заряд».

**Точечный заряд** — заряд такого заряженного тела, размеры которого значительно меньше расстояния от этого тела до точки наблюдения и до других тел (т. е. размерами заряженного тела в условиях данной задачи можно пренебречь).

Вспомните, закон всемирного тяготения также сформулирован для точечных тел (материальных точек).

**Закон Кулона.** Кулон детально исследовал взаимодействие неподвижных точечных зарядов. Он на опыте изучил зависимость сил электрического взаимодействия тел от модулей зарядов этих тел и расстояния между ними.



В своих опытах Кулон использовал специальный прибор — крутильные весы (рис. 98). Крутильные весы представляют собой два стеклянных цилиндра, внутри которых на тонкой серебряной нити подвешено лёгкое непроводящее коромысло. На одном конце коромысла закреплён проводящий шар 1, а на другом — бумажный противовес 3. Шар 1 можно заряжать с помощью такого же проводящего шара 2. Он находится на изолирующем стержне, закреплённом на крышке нижнего цилиндра. При соприкосновении шара 1 с заряженным шаром 2 заряд распределяется между ними поровну, и шары отталкиваются. По углу закручивания нити, отсчитываемому, но шкале прибора, можно определить силу взаимодействия заряженных шаров.

Проведя большое количество опытов, Кулон установил, что модуль сил взаимодействия двух заряженных шаров  $|\vec{F}_{21}| = |\vec{F}_{12}| = F$ , обратно

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

пропорционален квадрату расстояния между ними: и прямо пропорционален произведению модулей электрических зарядов каждого из них:

$$F \sim |q_1| \cdot |q_2|.$$

Обобщив экспериментальные данные, Кулон сформулировал закон, получивший его имя.

**Закон Кулона:** модули сил взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональны произведению модулей зарядов этих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а сами силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (17.1)$$

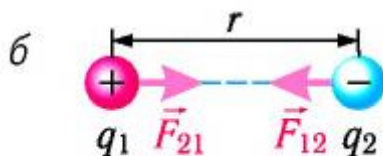
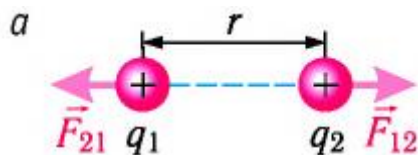
где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц физических величин;  $|q_1|$  и  $|q_2|$  — модули точечных зарядов;  $r$  — расстояние между ними.

В СИ коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

где — электрическая постоянная.



Силы  $\vec{F}_{21}$  и  $\vec{F}_{12}$  взаимодействия неподвижных точечных зарядов (рис. 99) называют кулоновскими силами. В соответствии с третьим законом Ньютона

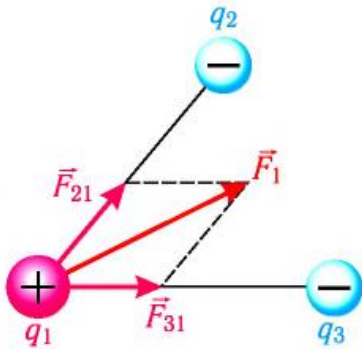
эти силы противоположно направлены  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ , а их модули равны.

Отметим, что силы электростатического взаимодействия являются силами отталкивания для одноимённых зарядов (рис. 99, а) и силами притяжения для разноимённых (рис. 99, б).

### Взаимодействие системы точечных зарядов

Экспериментально установили, что силы взаимодействия двух точечных зарядов не изменяются при появлении третьего точечного заряда или любого числа точечных зарядов. В этом случае силы

воздействия  $\vec{F}_{21}, \vec{F}_{31}, \dots, \vec{F}_{n1}$  каждого из зарядов  $q_2, q_3, \dots, q_n$  на заряд  $q_1$  определяют по закону Кулона. Результирующая сила является векторной суммой сил, которыми каждый из этих зарядов в отдельности воздействует на заряд  $q_1$  (принцип суперпозиции).



Используя принцип суперпозиции и закон Кулона, можно описать электростатическое взаимодействие любой системы точечных зарядов. На рисунке 100 представлены три взаимодействующих между собой точечных электрических заряда:  $q_1 > 0, q_2 < 0, q_3 < 0$ . Результирующей сил, действующих на заряд  $q_1$  со стороны зарядов  $q_2$  и  $q_3$ , является

сила  $\vec{F}_1$ , которая равна векторной сумме

сил  $\vec{F}_{21}$  и  $\vec{F}_{31}$ :  $\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$ . Силы  $\vec{F}_{21}$  и  $\vec{F}_{31}$  воздействия

зарядов  $q_2$  и  $q_3$  на заряд  $q_1$  определяют по закону Кулона.

### Интересно знать:

Понятие электрического заряда в некоторой степени сходно с понятием гравитационной массы. Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, а масса — гравитационных. Закон Кулона, описывающий электростатическое взаимодействие, формально похож на закон всемирного тяготения Ньютона, определяющий силы гравитационного взаимодействия:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

В обоих случаях модуль сил взаимодействия:



- - обратно пропорционален квадрату расстояния между материальными точками;
- - прямо пропорционален величинам, характеризующим те свойства тел (материальных точек), которые определяют взаимодействия, — массам в одном случае и электрическим зарядам — в другом.

Для измерения сил электрического отталкивания (Ш. Кулон, 1785 г.) и гравитационной постоянной (Г. Кавендиш, 1788 г.) учёные использовали похожие по устройству экспериментальные установки.

Однако между силами гравитационного и электростатического взаимодействий существует и важное различие. Ньютоновские силы тяготения — это всегда силы притяжения. Кулоновские же силы взаимодействия зарядов могут быть как силами притяжения (между разноимёнными зарядами), так и силами отталкивания (между одноимёнными зарядами).

#### *Диэлектрическая проницаемость вещества*

Из опытов следует, что взаимодействие электрически заряженных тел в воздухе практически не отличается от их взаимодействия в вакууме. Если заряженные тела находятся в воде, керосине, масле или какой-нибудь другой непроводящей среде, то модуль сил их взаимодействия оказывается меньше, чем в вакууме. Чтобы учесть влияние среды, ввели её специальную характеристику, называемую диэлектрической проницаемостью.

**Диэлектрическая проницаемость вещества — физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль сил электростатического взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше модуля сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме:**

$$\epsilon = \frac{F_0}{F},$$

где  $F_0$  и  $F$  — модули сил электростатического взаимодействия зарядов в вакууме и в однородной среде соответственно.

С учётом соотношения (17.2) закон Кулона можно записать следующим образом:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Диэлектрическая проницаемость вакуума равна 1. За 1 принимают и диэлектрическую проницаемость воздуха, поскольку её значение (при нормальном атмосферном давлении) 1,0006. Диэлектрические проницаемости других однородных сред всегда больше единицы. Например,

у воды диэлектрическая проницаемость 81, у глицерина — 56, а у керосина — 2.

### Интересно знать:

Диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 25°C равна 78,54, а при температуре 0°C — 88. Обычно без указания температуры диэлектрическую проницаемость воды полагают равной 81.



Точечный заряд — заряд такого заряженного тела, размеры которого значительно меньше расстояния от этого тела до точки наблюдения и до других тел (т. е. размерами заряженного тела в условиях данной задачи можно пренебречь)

Закон Кулона: модули сил взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональны произведению модулей зарядов этих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а сами силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела

В вакууме

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

В однородной среде

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$$

Коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{F r^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз модуль сил взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше, чем модуль сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}$$

### Пример №1

Два точечных заряда находятся в керосине на

расстоянии  $r_1 = 42$  см. Определите, на каком расстоянии должны находиться эти заряды в глицерине, чтобы модуль сил их электростатического взаимодействия остался прежним. Диэлектрические проницаемости керосина  $\epsilon_1 = 2,0$ , глицерина  $\epsilon_2 = 56,2$ .



Дано:  
 $r_1 = 42$  см  
 $F_{к1} = F_{к2}$   
 $\epsilon_1 = 2,0$   
 $\epsilon_2 = 56,2$

---

$r_2 = ?$

Решение. Поскольку  $F_{к1} = F_{к2}$ , то, воспользовавшись законом Кулона,

$$k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon_1 r_1^2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon_2 r_2^2}.$$

можно записать:

$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}.$$

Следовательно,

$$r_2 = 42 \text{ см} \sqrt{\frac{2,0}{56,2}} = 7,9 \text{ см}.$$

Ответ:  $r_2 = 7,9$  см.

### Пример №2

Точечные заряды  $q_1 = 3,4$  нКл и  $q_2 = -5,6$  нКл находятся в вакууме на расстоянии  $r = 36$  см. Определите модуль и направление результирующей силы, действующей на заряд  $q_3 = 3,2$  нКл, помещённый в точку пространства, находящуюся на середине отрезка, соединяющего эти заряды.

Дано:

$$q_1 = 3,4 \text{ нКл} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -5,6 \text{ нКл} = -5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 36 \text{ см} = 0,36 \text{ м}$$

$$q_3 = 3,2 \text{ нКл} = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

---

$$\vec{F}_p \text{ — ?}$$

**Решение.** Изобразим на рисунке силы  $\vec{F}_{13}$  и  $\vec{F}_{23}$ , действующие на точечный заряд  $q_3$  со стороны точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  соответственно. Построив векторную сумму сил  $\vec{F}_{13}$  и  $\vec{F}_{23}$ , определим, что результирующая  $\vec{F}_p$  этих сил направлена к заряду  $q_2$  (рис. 102).

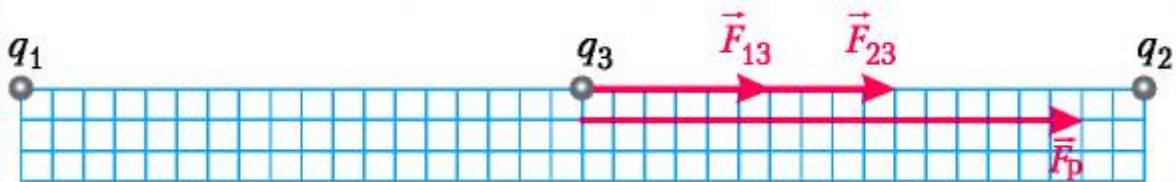


Рис. 102

Поскольку силы  $\vec{F}_{13}$  и  $\vec{F}_{23}$  направлены одинаково, то модуль

$$F_p = F_{13} + F_{23} = \frac{4kq_3}{r^2}(q_1 + |q_2|).$$

результирующей силы

Таким образом,

$$F_p = \frac{4 \cdot 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(0,36 \text{ м})^2} \cdot (3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} + 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 8,0 \text{ мкН}.$$

Ответ:  $F_p = 8,0 \text{ мкН}$ ; сила направлена к заряду  $q_2$ .

## Электростатическое поле

Заряженные тела и частицы, которые кратко называют зарядами, взаимодействуют друг с другом. Это подтверждают многочисленные опыты, а закон Кулона позволяет определить силы взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Но что является причиной подобного взаимодействия, каков его механизм?

Первым, кто догадался, что «тела действуют друг на друга на расстоянии посредством обращения окружающей среды в состояние напряжения», был выдающийся английский учёный Майкл Фарадей (1791 — 1867). Обобщая результаты собственных исследований, проведённых с 1832 по 1852 г., Фарадей ввёл в физику новое понятие — поле. Он рассматривал поле как материальную среду, которая является посредником при любых взаимодействиях удалённых друг от друга тел.

По современным представлениям, электрический заряд наделяет окружающее пространство особыми физическими свойствами — создаёт электрическое поле. Этот заряд называют источником поля и часто обозначают символом  $Q$ . Основным свойством электрического поля является его действие некоторой силой на внесённый в него заряд. Иначе говоря, заряды не действуют друг на друга непосредственно. Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством создаваемых ими полей.

Так, например, при взаимодействии неподвижных электрических зарядов электростатическое поле заряда  $q_1$  действует некоторой силой на заряд  $q_2$ , а поле заряда  $q_2$  действует на заряд  $q_1$ . Эти взаимодействия передаются не мгновенно, а с конечной скоростью, равной скорости света в

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

вакууме. По мере удаления от заряда-источника поле ослабевает.

**Электростатическое поле — поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами.**

Электростатическое поле существует в пространстве, окружающем неподвижные заряды, неразрывно с ними связано и не изменяется со временем. Силу, которой поле действует на вносимый в него электрический заряд, называют электрической силой или кулоновской силой.

Чтобы исследовать электростатическое поле, создаваемое зарядом  $Q$ , в него помещают заряд  $q_0$ , называемый пробным. Под пробным зарядом понимают заряд, модуль которого достаточно мал ( $|q_0| \ll |Q|$ ) и собственное поле не меняет существенно распределения остальных зарядов, создающих исследуемое поле. Пробный заряд должен быть точечным, чтобы

можно было исследовать поле в малых областях пространства. Пробный заряд может быть как положительным, так и отрицательным.

Отметим, что свойство электрического поля воздействовать некоторой силой проявляется не только в точке, в которой находится пробный заряд  $q_0$ . Это свойство присуще всем точкам поля, создаваемого зарядом  $Q$ .

Используя пробный заряд  $q_0$ , можно количественно охарактеризовать электростатическое поле, создаваемое любым заряженным телом, указав модуль и направление силы, действующей на заряд  $q_0$  в любой точке поля.

### Из истории физики:

По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самым важным открытием со времён Ньютона. Он писал, что «надо иметь могучий дар научного предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между зарядами и частицами». Фарадей создал концепцию электромагнитного поля, основанную на конечной скорости распространения любых взаимодействий. Математическую завершённость идее Фарадея придал его гениальный соотечественник и преемник Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879).



Электростатическое поле — поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами

Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством создаваемых ими полей

Основным свойством электрического поля является его действие некоторой силой на внесённый в него заряд

Пробный заряд  $q_0$

$|q_0| \ll |Q|$ , где  $Q$  — заряд-источник поля

точечный

может быть как положительным, так и отрицательным

### Напряжённость электростатического поля. Принцип суперпозиции

Для изучения свойств электростатического поля удобно использовать такую его характеристику, которая не зависит от числового значения пробного заряда и позволяет определить силу, действующую на заряд со стороны поля в любой его точке. Для гравитационного поля такой характеристикой, не зависящей от массы тела, является ускорение свободного

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

падения. Какая физическая величина является характеристикой электростатического поля?

### Напряжённость электростатического поля:

Пусть электростатическое поле создано в вакууме точечным зарядом  $Q > 0$ . Если в некоторую точку поля поместить пробный положительный заряд  $q_0$ , на него будет действовать кулоновская сила

$$F = k \frac{Qq_0}{r^2}.$$

отталкивания, модуль которой

Сила  $\vec{F}$  не может служить характеристикой поля, так как её модуль пропорционален значению пробного заряда  $q_0$ . Однако отношение модуля силы, которой электростатическое поле точечного заряда  $Q$  действует на пробный заряд  $q_0$ , не зависит от значения пробного заряда:

$$\frac{F}{q_0} = k \frac{Q}{r^2} \quad (19.1)$$

и, следовательно, может служить характеристикой поля.

Эту характеристику называют напряжённостью электростатического поля и обозначают  $\vec{E}$ . Напряжённость характеризует силовое действие поля на вносимые в него заряды.

**Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда:**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (19.2)$$

С учётом выражений (19.1) и (19.2) можно определить модуль напряжённости электростатического поля, созданного точечным зарядом  $Q$ , в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от него:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Таким образом, модуль напряжённости поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом, прямо пропорционален модулю этого заряда и обратно пропорционален квадрату расстояния между зарядом и точкой, в которой определяют значение напряжённости.

Если заряд  $Q$  находится в однородной среде с диэлектрической

$$E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}.$$

проницаемостью  $\epsilon$ , то модуль напряжённости поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Из выражения  $q_0$  следует, что единицей напряжённости

$$\left( \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right).$$

электростатического поля в СИ является ньютон на кулон

В СИ широко используют другое название этой единицы — вольт на

$$\text{метр} \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

Зная напряжённость электростатического поля, можно определить силу, действующую на любой точечный заряд в любой точке этого поля:

$$\vec{F} = \vec{E}q. \quad (19.3)$$

Напряжённость поля, как и сила, величина векторная. Направление напряжённости поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный электрический заряд. Напряжённость в любой точке электростатического поля точечного заряда направлена вдоль прямой, соединяющей эту точку и точечный заряд, создающий поле.

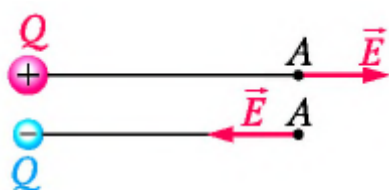


Рис. 104

Напряжённость поля, созданного точечным положительным зарядом  $Q > 0$ , направлена от заряда, а напряжённость поля, созданного точечным отрицательным зарядом  $Q < 0$ , — к заряду (рис. 104).

### Интересно знать:

Кроме гравитационного поля у Земли есть электрическое и магнитное поля. Модуль напряжённости электрического поля у поверхности Земли в среднем



составляет  $130 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ . Электрическое поле Земли меняется во времени. Избыточный отрицательный электрический заряд земного шара колеблется около  $-6 \cdot 10^5 \text{ Кл}$ .

### Принцип суперпозиции электрических полей:

Пусть пробный заряд  $q_0$  находится в некоторой точке электростатического поля, созданного не одним, а несколькими точечными зарядами.

Экспериментально установили, что результирующая сила, действующая на пробный заряд, равна векторной сумме сил, действующих со стороны электростатических полей этих точечных зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n. \quad (19.4)$$

Воспользовавшись формулой (19.3), можно определить силы, действующие на пробный заряд:

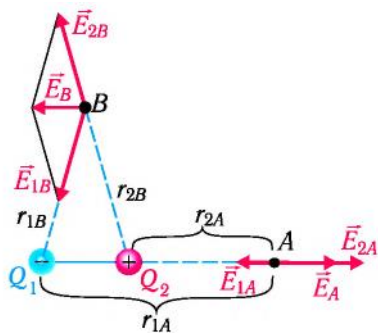
$$\vec{F} = \vec{E}q_0, \quad \vec{F}_1 = \vec{E}_1q_0, \quad \vec{F}_2 = \vec{E}_2q_0, \quad \vec{F}_3 = \vec{E}_3q_0, \quad \dots, \quad \vec{F}_n = \vec{E}_nq_0,$$

где  $\vec{E}$  — результирующая напряжённость поля системы точечных зарядов, а  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$  — напряжённости полей в данной точке, создаваемых 1-м, 2-м, 3-м, ...,  $n$ -м точечными зарядами.

Подставив эти выражения в соотношение (19.4), получим, что **если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$

Это положение называют принципом суперпозиции полей.



Воспользуемся принципом суперпозиции, чтобы определить в точках  $A$  и  $B$  напряжённости результирующего поля, созданного двумя точечными

электрическими зарядами противоположных знаков  $Q_1 < 0$  и  $Q_2 > 0$ , но с одинаковыми модулями (рис. 106).

Напряжённости  $\vec{E}_{1A}$  и  $\vec{E}_{2A}$  полей, созданных зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ , в точке  $A$  направлены вдоль прямой, соединяющей заряды, в противоположные стороны. Напряжённость  $\vec{E}_A$  результирующего поля в точке  $A$  равна векторной сумме напряжённостей  $\vec{E}_{1A}$  и  $\vec{E}_{2A}$  и также направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

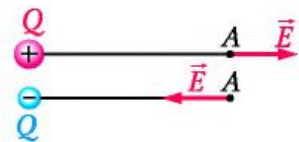
Напряжённость  $\vec{E}_B$  результирующего поля в точке  $B$ , находящейся вне прямой, соединяющей заряды, равна векторной сумме напряжённостей  $\vec{E}_{1B}$  и  $\vec{E}_{2B}$ . Определить её можно по правилу параллелограмма (см. рис. 106).



Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$

Модуль напряжённости поля, созданного точечным зарядом:

- в вакууме или в воздухе:  $E = k \frac{|Q|}{r^2}$ ;
- в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ :  $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$



Принцип суперпозиции: если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

### Пример №3

Два неподвижных точечных заряда  $Q_1 = 6,70$  нКл и  $Q_2 = -13,3$  нКл находятся в воздухе на расстоянии  $r = 5,00$  см друг от друга. Определите модуль напряжённости



электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1 = 3,00$  см от положительного заряда и  $r_2 = 4,00$  см от отрицательного.

Дано:

$$Q_1 = 6,70 \text{ нКл} = 6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$Q_2 = -13,3 \text{ нКл} =$$

$$= -1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 5,00 \text{ см} = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_1 = 3,00 \text{ см} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 4,00 \text{ см} = 4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$|\vec{E}| \text{ — ?}$$

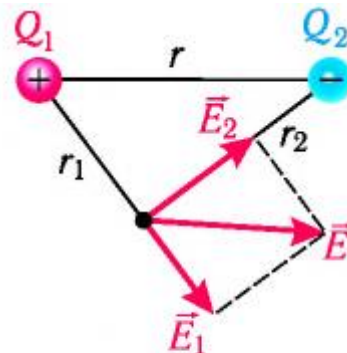


Рис. 109

**Решение.** Согласно принципу суперпозиции, напряжённость

резльтирующего поля  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$  (рис. 109) определяют по правилу

параллелограмма. Здесь  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  — напряжённости полей, создаваемых

точечными зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$  в данной точке. Из условия задачи и

теоремы Пифагора следует, что угол между  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  прямой.

Модуль напряжённости  $E$  результирующего поля найдём

по теореме Пифагора:  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ . Так как заряды  $Q_1$  и  $Q_2$  точечные, то

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2}, \quad E_2 = k \frac{|Q_2|}{r_2^2}.$$

$$E = k \sqrt{\left(\frac{Q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{r_2^2}\right)^2}.$$

С учётом этого

$$E = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \sqrt{\left(\frac{6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}\right)^2 + \left(\frac{1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{(4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}\right)^2} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

$$E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Ответ:

## Линии напряжённости электростатического поля

Для описания электростатического поля нужно знать как модуль, так и направление напряжённости в каждой его точке. Чтобы наглядно отображать распределение поля в пространстве, Фарадей в 1845 г. предложил способ изображения электрических полей в виде воображаемых линий. Их назвали линиями напряжённости или силовыми линиями.

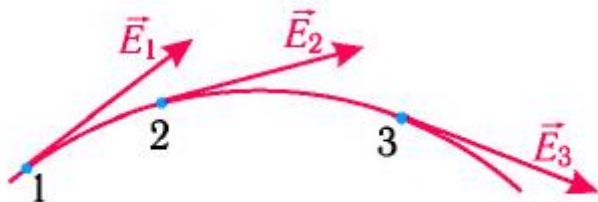
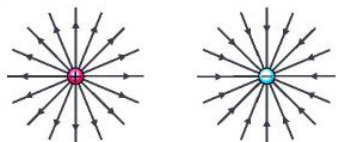


Рис. 111

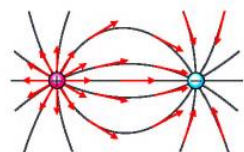
**Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля в той же точке (т.е. с направлением электростатической силы, действующей на положительный заряд) (рис. 111).**

Очевидно, что через любую точку поля, в которой  $\vec{E} \neq \vec{0}$ , можно провести одну и только одну линию напряжённости. В каждой такой точке напряжённость имеет вполне определённое направление.

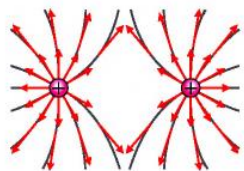
а



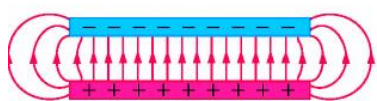
б



в



г



На рисунке изображены линии напряжённости полей, образованных зарядами, равномерно распределёнными по поверхности уединённых проводящих шариков. Направление каждой стрелки на рисунке 112, а совпадает с направлением напряжённости поля. Линии напряжённости в первом случае направлены от положительного заряда в бесконечность, а во втором — из бесконечности к отрицательному заряду и оканчиваются на нём. В электростатическом поле линии напряжённости начинаются и оканчиваются на электрических зарядах даже тогда, когда одним своим концом уходят в бесконечность, где и находятся недостающие на рисунке заряды.

На рисунке изображены линии напряжённости электростатического поля, образованного двумя разноимёнными зарядами, модули которых одинаковые, находящимися на

проводящих шариках. Стрелки показывают направления напряжённости поля в различных его точках.

На рисунке 112, в представлены линии напряжённости электростатического поля двух одинаково заряженных шариков.

На рисунке 112, г изображено поле, созданное зарядами противоположных знаков, модули которых одинаковые, находящимися на двух плоских металлических пластинах, длина которых много больше расстояния между ними. Линии напряжённости такого поля параллельны друг другу за исключением пространства вблизи краёв пластин и вне области их перекрытия. Электростатическое поле в центральной области между разноимённо заряженными металлическими пластинами является примером однородного поля.

**Однородное электростатическое поле — электростатическое поле, напряжённость которого во всех точках пространства одинакова.**

Электростатические поля, изображённые на рисунках, являются неоднородными, так как или модуль, или направление (или и то, и другое) напряжённости в разных точках поля отличается.

Линии напряжённости электростатического поля не прерываются в пространстве (при отсутствии в нём других зарядов), никогда не пересекаются и не касаются друг друга.

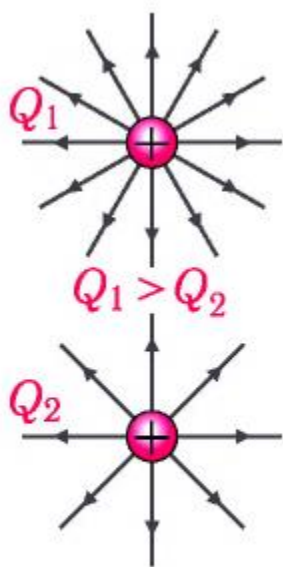
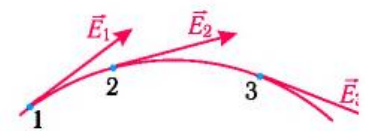


Рис. 113

Чтобы линии напряжённости отображали не только направление, но и модуль напряжённости поля, на рисунках их условились проводить с определённой густотой. Линии напряжённости идут гуще там, где модуль напряжённости поля больше, и реже там, где он меньше. В однородном электростатическом поле густота линий напряжённости не меняется. Картины линий напряжённости принято строить так, чтобы она, по возможности, отображала симметрию изображаемого электростатического поля. Число линий напряжённости, началом или концом которых служит данный заряд, пропорционально значению этого заряда (рис. 113).



Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля



начинаются на положительном заряде и оканчиваются на отрицательном заряде тел

не пересекаются, так как в каждой точке поля напряжённость имеет одно конкретное направление

не прерываются в пространстве, не содержащем электрических зарядов

по густоте линий можно судить о модуле напряжённости электростатического поля

Однородное электростатическое поле — электростатическое поле, напряжённость которого в любой его точке одинакова

## Работа силы однородного электростатического поля

Электростатическое поле, действуя на находящиеся в нём заряды с определённой силой, может их перемещать. Вы знаете, что при перемещении тела действующая на него сила совершает работу. Выясним, от чего зависит работа силы по перемещению электрического заряда в электростатическом поле.

Расчёты и результаты экспериментов доказали, что работа силы электростатического поля при перемещении заряда между двумя точками зависит только от положения этих точек и не зависит от вида траектории. Такой же особенностью, как вы знаете, обладает и гравитационное поле. Физические поля, работа сил которых не зависит от формы траектории, называют потенциальными.

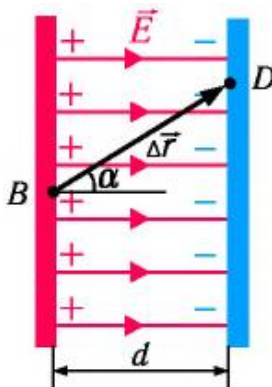


Рис. 114

Выясним, как можно определить работу силы однородного электростатического поля напряжённостью  $\vec{E}$  по перемещению положительного пробного заряда  $q_0$ . Поскольку электростатическое поле является потенциальным, то при перемещении заряда из точки  $B$  в точку  $D$  (рис. 114) работа силы поля независимо от формы траектории имеет одно и то же значение. Определим эту работу для случая, когда заряд перемещается вдоль отрезка прямой  $BD$ .

Вам известно, что работа силы  $A = F\Delta r \cos\alpha$ , где  $F$  — модуль силы, действующей на тело;  $\Delta r$  — модуль перемещения тела под действием этой силы;  $\alpha$  — угол между направлениями силы и перемещения. В нашем случае модуль электрической силы  $F = q_0E$ , поэтому работа силы поля  $A_{BD} = q_0E\Delta r \cos\alpha$ . Поскольку  $\Delta r \cos\alpha = d$  (см. рис. 114), где  $d$  — расстояние между заряженными пластинами, создающими поле, то

$$A_{BD} = q_0Ed. \quad (21.1)$$

Работа силы электростатического поля может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Например, если бы заряд перемещался не из точки  $B$  в точку  $D$ , а наоборот — из точки  $D$  в точку  $B$ , то работа силы была бы отрицательной:  $A_{DB} = -q_0Ed$ . При перемещении заряда перпендикулярно линиям напряжённости работа силы поля  $A=0$ .

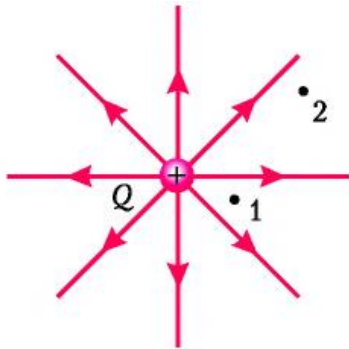


Рис. 116

### Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле

Электростатическое поле является потенциальным, и, следовательно, работа силы поля по перемещению электрического заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 (рис. 116) может служить мерой изменения потенциальной энергии этого заряда в поле, созданном

зарядом  $Q$ . Пусть  $W_{п1}$  и  $W_{п2}$  — потенциальные энергии перемещаемого заряда в точках 1 и 2 электростатического поля. Тогда работа силы поля

$$A_{12} = -\Delta W_{п12} = -(W_{п2} - W_{п1}), \quad (21.2)$$

где  $\Delta W_{п12}$  — приращение потенциальной энергии заряда  $q$  при его перемещении из точки 1 в точку 2.

Перепишем выражение (21.2) в виде

$$A_{12} = W_{п1} - W_{п2} \quad (21.3)$$

и проанализируем его, когда на заряд  $q$  действует только сила со стороны электростатического поля:

1) если работа силы поля  $A_{12} > 0$  (перемещение положительного заряда  $q$  происходит в направлении линий напряжённости поля), то потенциальная энергия заряда уменьшается:  $\Delta W_{п12} < 0$ . При этом, согласно закону



энергии, увеличивается кинетическая энергия тела с

$$q: \frac{mv_2^2}{2} > \frac{mv_1^2}{2};$$

зарядом

2) если работа силы поля  $A_{12} < 0$  (перемещение положительного заряда противоположно направлению линий напряженности поля), то

потенциальная энергия заряда увеличивается:  $\Delta W_{\text{п}12} > 0$ . При этом

$$\frac{mv_2^2}{2} < \frac{mv_1^2}{2};$$

кинетическая энергия заряженного тела уменьшается

3) если работа силы поля  $A_{12} = 0$  (перемещение заряда перпендикулярно направлению линий напряженности поля), то потенциальная энергия заряда не изменяется.

### **Потенциал электростатического поля как его энергетическая характеристика.**

Из выражений (21.1) и (21.2) следует, что потенциальная энергия пробного заряда  $q_0$  в данной точке поля пропорциональна величине этого заряда.

$$\frac{W_{\text{п}}}{q_0}$$

Следовательно, отношение  $\frac{W_{\text{п}}}{q_0}$  не зависит от заряда и является энергетической характеристикой электростатического поля, получившей название потенциал.

**Потенциал электростатического поля в данной точке пространства** — физическая скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии пробного заряда, помещенного в данную точку поля, к значению этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q_0}. \quad (21.4)$$

За единицу потенциала в СИ принят вольт (В). Единица названа в честь итальянского учёного Алессандро Вольта (1745—1827), внесшего большой вклад в изучение электрических явлений. 1 В — потенциал такой точки электростатического поля, в которой заряд 1 Кл обладал бы потенциальной энергией 1 Дж.

Потенциал  $\varphi$  электростатического поля точечного заряда  $Q$  на расстоянии  $r$  от него в вакууме или в воздухе определяют соотношением

$$\varphi = k \frac{Q}{r}. \quad (21.5)$$

Знак заряда-источника поля определяет знак потенциала этого поля.

Если электрическое поле создано в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , то потенциал поля

$$\varphi = k \frac{Q}{\epsilon r}.$$

Потенциал является скалярной величиной. Поэтому, **если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то потенциал результирующего поля в этой точке равен алгебраической сумме потенциалов полей в этой же точке пространства, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:**

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n,$$

т. е. для потенциала выполняется принцип суперпозиции.



Работа силы электростатического поля по перемещению заряда:

- из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории;
- может быть положительной, отрицательной или равной нулю;
- при перемещении заряда по замкнутой траектории равна нулю

Работа силы однородного электростатического поля по перемещению заряда:  
 $A = qEd$

Работа силы электростатического поля по перемещению заряда из начальной точки 1 в конечную точку 2 равна приращению потенциальной энергии заряда в этом поле, взятому со знаком минус, или же убыли потенциальной энергии:  
 $A_{12} = -\Delta W_{n12} = -(W_{n2} - W_{n1}) = W_{n1} - W_{n2}$

Потенциал электростатического поля в данной точке пространства — физическая скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии пробного заряда, помещённого в данную точку поля, к значению этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_{\pi}}{q_0}$$

Потенциал электростатического поля точечного заряда:

- в вакууме  
 $\varphi = k \frac{Q}{r};$
- в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$   
 $\varphi = k \frac{Q}{\epsilon r}$

Если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то потенциал результирующего поля в этой точке равен алгебраической сумме потенциалов полей в этой же точке пространства, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:  
 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n$

#### Пример №4

Электростатическое поле создано неподвижным точечным зарядом  $Q$ . В точке, находящейся на расстоянии  $r = 80$  см от заряда, потенциал поля  $\varphi = 0,42$  кВ. Определите модуль силы, действующей со стороны поля на точечный заряд  $q = 1,5$  нКл, помещённый в эту точку.

Дано:

$$r = 80 \text{ см} = 0,80 \text{ м}$$

$$\varphi = 0,42 \text{ кВ} = 4,2 \cdot 10^2 \text{ В}$$

$$q = 1,5 \text{ нКл} = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$F \text{ — ?}$$

Решение. Модуль силы, которой электростатическое поле заряда  $Q$  действует на заряд  $q_2$ , можно определить, воспользовавшись законом Кулона:

$$F = k \frac{Qq}{r^2}. \quad (1)$$

Из формулы (21.5) для потенциала поля точечного заряда найдём значение заряда:

$$Q = \frac{\varphi r}{k}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим:

$$F = k \frac{q\varphi r}{kr^2} = \frac{q\varphi}{r}.$$

$$F = \frac{1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 4,2 \cdot 10^2 \text{ В}}{0,80 \text{ м}} = 7,9 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Ответ:  $F = 7,9 \cdot 10^{-7}$  Н.

#### Разность потенциалов электростатического поля

#### Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля:

Потенциальная энергия любой системы тел, взаимодействующих посредством потенциальных сил, зависит от выбора нулевой точки (нулевого уровня). Однако изменение потенциальной энергии однозначно



характеризует процесс перехода системы из одного состояния в другое. Это относится и к изменению потенциальной энергии заряженной частицы (заряда) в электростатическом поле.

Перемещение заряженных частиц в электростатическом поле, сопровождаемое изменением их потенциальной энергии, характеризуют, используя понятие «разность потенциалов». Как и приращение потенциальной энергии, разность потенциалов не зависит от выбора нулевой точки. Пусть пробный заряд  $q_0$  перемещается в электростатическом поле под действием силы поля из точки 1 в точку 2, потенциалы которых  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (рис. 118).

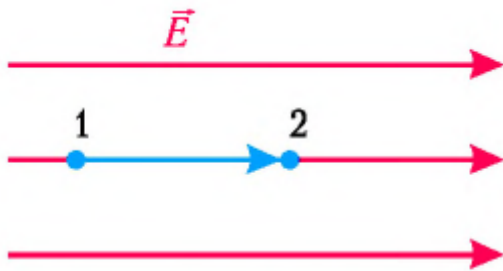


Рис. 118

Разность потенциалов  $U_{12}$  между двумя точками электростатического поля — физическая скалярная величина, равная отношению работы, совершаемой силой поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную, к значению этого заряда:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

С учётом выражений (21.3) и (21.4) получим:

$$U_{12} = \frac{W_{п1} - W_{п2}}{q_0} = \frac{\varphi_1 q_0 - \varphi_2 q_0}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (22.1)$$

Из выражения (22.1) следует, что разность потенциалов численно равна убыли потенциальной энергии перемещаемого в поле единичного пробного заряда.

Противоположную по знаку разности потенциалов величину называют приращением потенциала  $\Delta\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = -(\varphi_1 - \varphi_2) = -U_{12}$ .

За единицу разности потенциалов в СИ принимают вольт (В). 1 В — разность потенциалов  $U_{12}$  таких двух точек поля, для которых при перемещении

заряда 1 Кл из точки 1 в точку 2 сила, действующая на заряд со стороны поля, совершила бы работу 1 Дж.

Отметим, что когда говорят о «потенциале поля в некоторой точке», под этим всегда понимают разность потенциалов между этой точкой и точкой, потенциал поля в которой приняли равным нулю.

Потенциал проводника можно измерить электрометром. Для этого проводник соединяют со стрелкой электрометра, корпус которого заземляют. Отклонение стрелки электрометра покажет наличие разности потенциалов между проводником и Землёй. Приняв потенциал Земли равным нулю, можно считать, что электрометр измеряет потенциал проводника.

Если имеются два заряженных проводника, то, соединив один из них со стрелкой, а другой — с корпусом электрометра, измеряют разность потенциалов между заряженными проводниками.

**Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля.** Термин «напряжение» ввёл в 1792 г. Вольт. Отметим, что для электростатических полей понятия «электрическое напряжение» и «разность потенциалов» тождественны.

Работа, совершаемая силой однородного электростатического поля напряжённостью  $\vec{E}$  при перемещении пробного положительного заряда  $q_0$  из точки 1 с потенциалом  $\varphi_1$  в точку 2 с потенциалом  $\varphi_2 < \varphi_1$ , может быть определена в соответствии с выражением (22.1)

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2),$$

а в соответствии с выражением (21.1)

$$A_{12} = q_0Ed,$$

где  $d$  — модуль перемещения заряда вдоль линии напряжённости однородного электростатического поля.

Приравняв соответствующие части равенств, найдём выражение, устанавливающее связь между модулем напряжённости однородного электростатического поля и разностью потенциалов, т. е. между двумя характеристиками электростатического

поля:  $q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0Ed$ , откуда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = -\frac{\Delta\varphi_{12}}{d}. \quad (22.2)$$

Из выражения (22.2) следует: чем больше разность потенциалов между двумя точками однородного электростатического поля, тем больше модуль напряжённости поля. Если разность потенциалов равна нулю (потенциал поля не меняется), то модуль напряжённости поля также равен нулю.

Принимая во внимание, что  $U_{12} = -\Delta\varphi_{12}$ , получим:

$$E = \frac{U_{12}}{d}. \quad (22.3)$$

На основании формулы (22.3) вводят единицу напряжённости СИ вольт на метр  $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$ . 1  $\frac{\text{В}}{\text{м}}$  — модуль напряжённости такого однородного электростатического поля, в котором напряжение между двумя точками, находящимися на одной и той же линии напряжённости на расстоянии 1 м, составляет 1 В.

Используя термин «напряжение», на практике точки 1 и 2 поля выбирают так, чтобы  $U_{12} > 0$ .



Разностью потенциалов между двумя точками электростатического поля называют физическую скалярную величину, равную отношению работы, совершаемой силой поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную точку, к значению перемещаемого заряда:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0}$$

Разность потенциалов численно равна убыли потенциальной энергии перемещаемого в поле единичного пробного заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\Delta W_{п12}}{q_0}$$

Работа, совершаемая силой поля при перемещении заряда:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}$$

Модуль напряжённости однородного электростатического поля и разность потенциалов (напряжение) связаны между собой соотношением:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U_{12}}{d},$$

если точки 1 и 2 поля выбраны так, что  $U_{12} > 0$

### Пример №5

Электростатическое поле создано точечным

зарядом  $Q = 2,4$  нКл. Определите работу силы поля по переносу

пробного заряда  $q_0 = 3,0$  пКл из точки А в точку В, если точки находятся на расстояниях  $r_A = 1,0$  м и  $r_B = 4,0$  м от заряда-источника поля, а среда — однородное вещество с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,0$ .

Дано:

$$Q = 2,4 \text{ нКл} = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_0 = 3,0 \text{ пКл} = 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$$

$$r_A = 1,0 \text{ м}$$

$$r_B = 4,0 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 2,0$$

---

$$A_{AB} \text{ — ?}$$

**Решение.** Поле электростатическое, поэтому работа силы поля при переносе пробного заряда  $q_0$  из точки А в точку В не зависит от формы траектории и её можно определить по формуле  $A_{AB} = q_0(\varphi_A - \varphi_B)$ . Потенциалы точек

$$\varphi_A = \frac{kQ}{\varepsilon r_A} \quad \text{и} \quad \varphi_B = \frac{kQ}{\varepsilon r_B}$$

А и В данной среде соответственно.

Тогда

$$A_{AB} = q_0 \left( \frac{kQ}{\varepsilon r_A} - \frac{kQ}{\varepsilon r_B} \right) = \frac{kQq_0}{\varepsilon} \cdot \frac{r_B - r_A}{r_A r_B}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$A_{AB} = \frac{9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot (4,0 \text{ м} - 1,0 \text{ м})}{2,0 \cdot 1,0 \text{ м} \cdot 4,0 \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Ответ:  $A_{AB} = 2,4 \cdot 10^{-11}$  Дж.

### Пример №6

Электрон начинает двигаться в электрическом поле от точки 1 до точки 2.

Определите модуль скорости движения электрона в точке 2, если он

ускоряется разностью потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2 = -40$  В. Модуль заряда электрона

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \text{ а его масса } m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Дано:

$$v_1 = 0$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -40 \text{ В}$$

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_2 = ?$$

**Решение.** Сила электрического поля совершает работу по изменению кинетической энергии электрона:  $A_{12} = \Delta W_k$ . Работу силы поля также можно определить по формуле  $A_{12} = e(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Тогда

$$\Delta W_k = e(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

Изменение кинетической энергии электрона

$$\Delta W_k = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2}, \text{ где } \frac{m_e v_1^2}{2} = 0.$$

Тогда с учётом формулы (1) модуль скорости движения электрона в точке 2:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta W_k}{m_e}} = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m_e}}.$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot (-40 \text{ В}) \cdot 2}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 3,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$v_2 = 3,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:

## Конденсаторы

Во многих электротехнических и радиотехнических приборах используют устройства, способные при малых размерах накапливать значительные разноимённые электрические заряды и связанную с ними электрическую энергию. Какие это устройства и от чего зависят накопленные ими заряды и запасённая энергия?

Для накапливания значительных разноимённых зарядов используют устройство, называемое конденсатором (от лат. condensator, буквально — тот, кто уплотняет, сгущает). Простейший конденсатор — система, состоящая из двух проводников, разделённых слоем диэлектрика, толщина  $d$  которого мала по сравнению с размерами проводников (рис. 119). Проводники, образующие конденсатор, называют его обкладками.

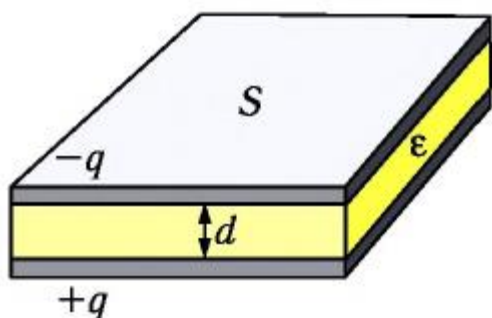


Рис. 119

На обкладках конденсатора накапливаются противоположные по знаку электрические заряды, модули которых равны. Процесс накапливания зарядов на обкладках называют зарядкой конденсатора, а процесс нейтрализации зарядов при соединении обкладок конденсатора проводником — разрядкой конденсатора. Модуль заряда, находящегося на одной из

обкладок конденсатора, называют зарядом конденсатора.

### Из истории физики:

В 1745—1746 гг. немецкий физик Эвальд фон Клейст (1700—1748) и нидерландский физик Питер ван Мушенбрук (1692—1761) независимо друг от друга изобрели первый конденсатор — лейденскую банку. Изобретение конденсатора способствовало изучению электрических явлений, так как позволило накапливать большие электрические заряды.

### Интересно знать:

Широко распространённый тип конденсаторов представляют собой две ленты металлической фольги, разделённые тонкой парафинированной бумагой, полистиролом, слюдой или другим диэлектриком, которые свёрнуты в тугий рулон и запаены (рис. 120). Используют и так называемые воздушные конденсаторы, в которых изолирующим слоем, отделяющим проводники, является воздух.



Рис. 120

### Ёмкость конденсатора

В процессе зарядки простейшего конденсатора его обкладки приобретают противоположные по знаку заряды  $q$  и  $-q$ , модули которых равны. Эти заряды создают между обкладками электростатическое поле, линии напряжённости которого начинаются на

положительно заряженной обкладке и заканчиваются на отрицательно заряженной. Многочисленные эксперименты свидетельствуют, что при



неизменных размерах и форме проводников (обкладок конденсатора), а также диэлектрических свойствах среды, в которой они находятся, сохраняется прямая пропорциональная зависимость между зарядом конденсатора и напряжением между его обкладками.

Следовательно, величина, равная отношению  $\frac{q}{U}$  заряда конденсатора к напряжению между его обкладками, является постоянной для данного конденсатора и не зависит ни от заряда, ни от напряжения. Эту величину назвали электрической ёмкостью  $C$  (электроёмкостью). Электроёмкость количественно характеризует способность конденсатора накапливать электрические заряды.

**Электрическая ёмкость конденсатора** — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (23.1)$$

Проанализировав формулу (23.1), можно сделать вывод: чем меньше напряжение  $U$  на обкладках конденсатора при сообщении им зарядов  $q$  и  $-q$ , тем больше электроёмкость конденсатора.

Единицей электрической ёмкости в СИ является фарад (Ф).

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

1 Ф — очень большая электроёмкость.

Электроёмкостью  $C = 1 \text{ Ф}$  обладал бы находящийся в вакууме уединённый шар радиусом  $R = 9 \cdot 10^9 \text{ м}$  (для сравнения: радиус земного шара  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ ). Поэтому на практике применяют дольные единицы: микрофарад ( $1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ), нанофарад ( $1 \text{ нФ} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ ) и пикофарад ( $1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Например, электроёмкость такого огромного проводника, как земной шар, равна  $C = 0,71 \text{ мФ}$ , а электроёмкость человеческого тела примерно  $C = 50 \text{ пФ}$ .

### Из истории физики:

В XVII—XVIII вв. учёные рассматривали электричество как «нематериальную жидкость». Эта «жидкость» могла «вливаться» в

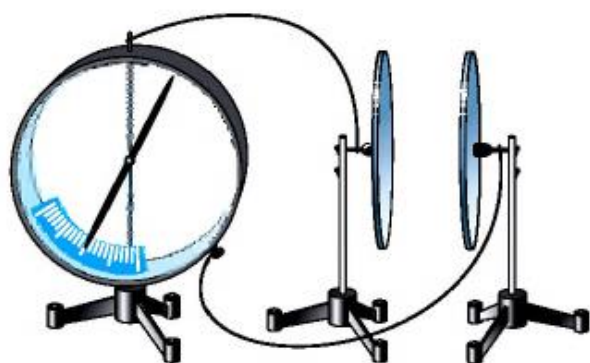


Рис. 122

проводник и «выливаться» из него. Так появился термин «электрическая ёмкость».

### Интересно знать:

На схемах номинальную электроёмкость конденсаторов обычно указывают в микрофарадах и пикофарадах. Однако реальная электроёмкость конденсатора может значительно меняться в зависимости от многих факторов. Другой, не

менее важной, характеристикой конденсаторов является номинальное напряжение — значение напряжения, обозначенное на конденсаторе, при котором его можно использовать в заданных условиях в течение срока службы. Это напряжение может находиться в пределах от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт. Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. Для многих типов конденсаторов с увеличением температуры допустимое напряжение уменьшается.

### Электроёмкость плоского конденсатора

Если обкладками конденсатора являются две одинаковые параллельные друг другу пластины, то конденсатор называют плоским.

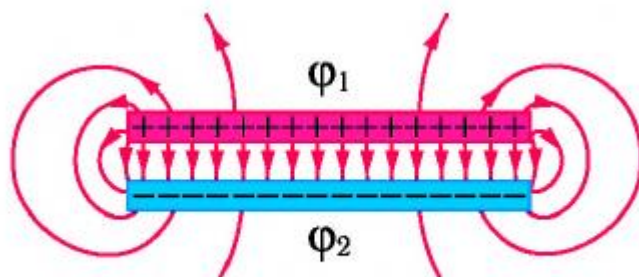


Рис. 121

Электростатическое поле заряженного плоского конденсатора в основном сосредоточено между его обкладками и является практически однородным. Вблизи краёв пластин

однородность поля нарушается, однако этим часто пренебрегают, когда расстояние между пластинами значительно меньше их размеров (рис. 121).

Чтобы установить, от чего зависит электроёмкость плоского конденсатора, проведём несколько опытов. В качестве обкладок конденсатора используем две металлические пластины, расположенные в воздухе на некотором расстоянии параллельно друг другу. Соединим стержень электрометра с одной из пластин, а его корпус с другой (рис. 122). Зарядим конденсатор, подключив его к источнику тока на некоторый промежуток времени. Когда между пластинами конденсатора возникнет напряжение (стрелка электрометра отклонится), отключим его от источника тока.



Если перемешать пластины относительно друг друга, уменьшая площадь их взаимного перекрытия при неизменном расстоянии между ними, то показания электрометра при этом увеличиваются, хотя сообщённый пластинам при зарядке конденсатора заряд не изменяется. Так как напряжение между пластинами увеличивается при уменьшении площади перекрытия пластин конденсатора, то его ёмкость должна уменьшаться ( $S \downarrow \Rightarrow C \downarrow$ ).

Увеличивая расстояние между пластинами конденсатора, не меняя площади их перекрытия, будем наблюдать возрастание показаний электрометра, т. е. увеличение напряжения между пластинами конденсатора, что возможно при уменьшении его ёмкости. Значит, чем больше расстояние между пластинами конденсатора, тем меньше его ёмкость ( $d \uparrow \Rightarrow C \downarrow$ ).

Если между обкладками конденсатора поместить пластину из диэлектрика, например из стекла, то показания электрометра уменьшатся. Напряжение между обкладками в этом случае уменьшается, следовательно, ёмкость конденсатора увеличивается ( $\epsilon \uparrow \Rightarrow C \uparrow$ ).

В СИ коэффициентом пропорциональности между ёмкостью конденсатора и определяющими её величинами ( $S, d, \epsilon$ ) является

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

электрическая постоянная

Результаты экспериментов позволяют записать формулу для определения ёмкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  — площадь одной из обкладок конденсатора (площадь взаимного перекрытия обкладок конденсатора);  $d$  — расстояние между обкладками;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды, находящейся

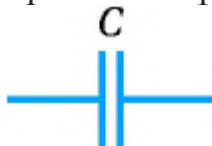


Рис. 123

между его обкладками.

Условное изображение конденсатора постоянной ёмкости на электрических схемах представлено на рисунке 123.

**Интересно знать:**

Зависимость электроёмкости конденсатора от расстояния между его обкладками используют в схемах кодирования клавиатуры персонального компьютера. Под каждой клавишей находится конденсатор, электроёмкость которого изменяется при нажатии на клавишу. Микросхема, подключённая к каждой клавише, при изменении электроёмкости выдаёт кодированный сигнал, соответствующий данной букве (рис. 124).



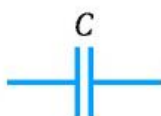
Рис. 124



Электрическая ёмкость конденсатора — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}$$

Условное обозначение:



Электроёмкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

Зависит от площади взаимного перекрытия обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости среды, находящейся между обкладками.

### Пример №7

Плоскому конденсатору электроёмкостью  $C = 0,4$  мкФ сообщён электрический заряд  $q = 2$  нКл. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками конденсатора, если расстояние между ними  $d = 5$  мм.

Дано:

$$C = 0,4 \text{ мкФ} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$q = 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$d = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

---

$E$  — ?

**Решение.** Модуль напряжённости однородного электростатического поля

$$E = \frac{U}{d}.$$

определим по формуле  $E = \frac{U}{d}$ . Так как напряжение между обкладками

$$U = \frac{q}{C}, \text{ то } E = \frac{q}{Cd}.$$

конденсатора:

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$E = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Ответ:

### Пример №8

Пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено диэлектриком. Конденсатор зарядили до напряжения  $U_1 = 1 \text{ кВ}$  и отключили от источника тока. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если после его удаления из конденсатора напряжение увеличилось до  $U_2 = 3 \text{ кВ}$ .

Дано:

$$U_1 = 1 \text{ кВ} = 1 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$U_2 = 3 \text{ кВ} = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\epsilon_2 = 1$$

---

$\epsilon_1$  — ?

Решение. В обоих случаях заряд конденсатора будет

одинаковым  $q_1 = q_2$ , так как он отключён от источника тока.

Поскольку  $q_1 = C_1 U_1$ ,  $q_2 = C_2 U_2$ , то

$$C_1 U_1 = C_2 U_2. \quad (1)$$

Ёмкость плоского конденсатора определяют по формуле

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

Для рассматриваемых случаев ёмкости соответственно равны:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{d}. \quad (2)$$

Подставив формулы (2) в равенство (1),

$$\epsilon_1 U_1 = \epsilon_2 U_2, \quad \epsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \epsilon_2.$$

получим:

$$\epsilon_1 = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ В}}{1 \cdot 10^3 \text{ В}} \cdot 1 = 3.$$

Ответ:  $\epsilon_1 = 3$ .

### Энергия электростатического поля конденсатора

Процесс зарядки конденсатора можно представить как перенос заряда  $q$  с одной обкладки на другую, в результате чего одна из них приобретает заряд  $-q$ , а другая -  $+q$ . Работа, совершённая при этом внешней силой, равна энергии электростатического поля заряженного конденсатора.

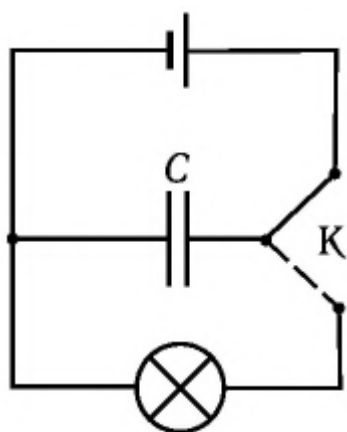


Рис. 125

Убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно на опыте. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, конденсатора и электрической лампы. Схема цепи представлена на рисунке 125. Зарядим конденсатор, подсоединив его к источнику тока. Затем, отключив конденсатор от источника тока, подсоединим его к лампе. При этом наблюдаем кратковременную вспышку света. В данном случае во время

разрядки конденсатора энергия, запасённая им при зарядке, превращается во внутреннюю энергию спирали лампы, часть этой энергии расходуется на излучение света. При прохождении электрического тока по цепи с источником тока конденсатор заряжался, т. е. на его обкладках накапливались электрические заряды. При этом в окружающем конденсатор пространстве возникло электростатическое поле. Суммарный электрический заряд обеих обкладок конденсатора до его зарядки, во время зарядки и после разрядки конденсатора равен нулю. Единственное изменение, которое произошло при разрядке конденсатора, заключается в том, что исчезло электростатическое поле, которое создавалось зарядами обеих обкладок конденсатора. Следовательно, энергией обладало электростатическое поле, образованное зарядами обкладок заряженного конденсатора.

Расчёты подтверждают, что формулу для определения энергии электростатического поля заряженного конденсатора можно записать в виде:

$$W = \frac{qU}{2}, \text{ или } W = \frac{CU^2}{2}, \text{ или } W = \frac{q^2}{2C}.$$

#### *Применение конденсаторов*

Конденсаторы находят широкое применение в электротехнике, радиотехнической и телевизионной аппаратуре, радиолокационной технике, телефонии, технике счётно-решающих устройств, лазерной технике, электроэнергетике (например, для улучшения коэффициента мощности промышленных установок, регулирования напряжения в распределительных сетях, в устройствах освещения люминесцентными лампами), металлопромышленности (например, для плавки и термической обработки металлов), добывающей промышленности (например, в электровзрывных устройствах), медицинской технике (например, в рентгеновской аппаратуре, приборах электротерапии), фототехнике (для получения вспышки света при фотографировании).

В связи с этим наряду с миниатюрными конденсаторами (рис. 126, а), имеющими массу менее грамма и размеры порядка нескольких миллиметров, существуют конденсаторы с массой в несколько тонн (рис. 126, б).

а



б

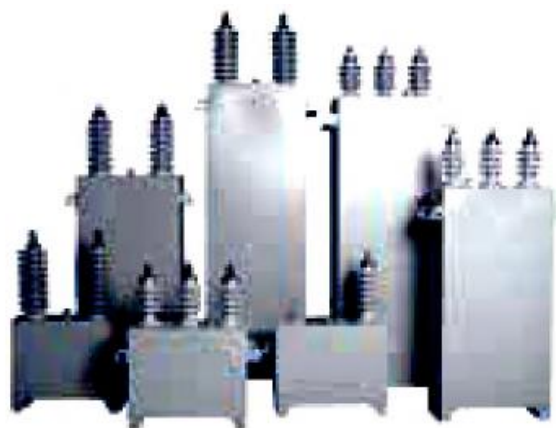
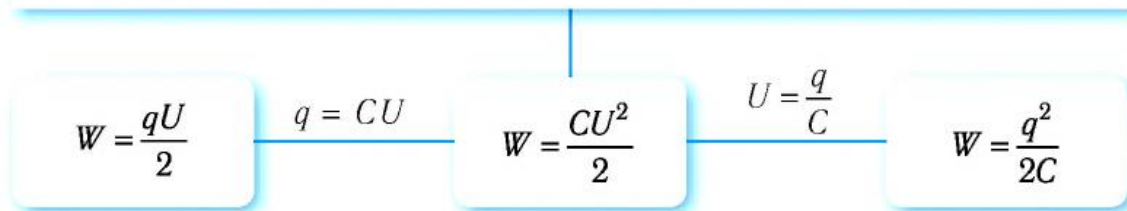


Рис. 126



### Энергия электростатического поля конденсатора



### Пример №9

Определите, как и во сколько раз изменится энергия электростатического поля заряженного плоского воздушного конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить керосином, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon_2 = 2$ . Рассмотрите случаи: а) конденсатор отключён от источника тока; б) конденсатор подключён к источнику тока.

Дано: $\epsilon_1 = 1$ $\epsilon_2 = 2$	
$\frac{W_2}{W_1} = ?$	

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

Решение. Электроёмкость воздушного конденсатора

Электроёмкость этого конденсатора после заполнения пространства между

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d}$$

обкладками керосином

Следовательно,  $C_2 = \epsilon_2 C_1$ .

В случае а) конденсатор отключён от источника тока,

поэтому  $q_2 = q_1$ . Тогда, если энергия электростатического поля

$$W_1 = \frac{q^2}{2C_1},$$

воздушного конденсатора

то энергия электростатического поля этого конденсатора, заполненного керосином:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2\epsilon_2 C_1} = \frac{W_1}{\epsilon_2}.$$

Таким образом, энергия электростатического поля уменьшилась в 2 раза. В случае б) конденсатор не отключён от источника тока, поэтому напряжение



между его обкладками равно напряжению между полюсами источника тока  $U_2 = U_1 = U$ . Тогда, если энергия электростатического поля

$$W_1 = \frac{C_1 U^2}{2},$$

воздушного конденсатора то энергия электростатического поля этого конденсатора, заполненного керосином:

$$W_2 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{\epsilon_2 C_1 U^2}{2} = \epsilon_2 W_1.$$

Таким образом, энергия электростатического поля увеличилась в 2 раза.

Ответ: а) энергия электростатического поля уменьшилась в 2 раза; б) энергия электростатического поля увеличилась в 2 раза.

### Пример №10

Плоский воздушный конденсатор, площадь перекрытия обкладок которого  $S = 100 \text{ см}^2$ , поместили в керосин с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,0$  и подключили к источнику тока с напряжением на полюсах  $U = 120 \text{ В}$ . Определите минимальную работу, которую необходимо совершить внешней силе, чтобы после отключения конденсатора от источника тока медленно увеличить расстояние между его обкладками от  $d_1 = 1,0 \text{ см}$  до  $d_2 = 2,0 \text{ см}$ .

Дано:

$$S = 100 \text{ см}^2 = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\epsilon = 2,0$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$d_1 = 1,0 \text{ см} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A_{\text{внеш}}^{\text{min}} \text{ — ?}$$

Решение. Модуль заряда каждой из обкладок конденсатора

$$q = C_1 U = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U}{d_1}.$$

Энергия электростатического поля конденсатора до изменения расстояния между его обкладками

$$W_1 = \frac{qU}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d_1}.$$

После отключения конденсатора от источника тока заряды на его обкладках не изменяются.

Энергию электростатического поля конденсатора после увеличения расстояния между его пластинами определим следующим образом:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{(\epsilon\epsilon_0 SU)^2 d_2}{2d_1^2 \epsilon\epsilon_0 S} = \frac{\epsilon\epsilon_0 SU^2 d_2}{2d_1^2}.$$

Минимальная работа, которую необходимо совершить внешней силой, чтобы увеличить расстояние между обкладками конденсатора, равна приращению энергии электростатического поля конденсатора, так как при медленном увеличении расстояния между обкладками конденсатора их кинетическая энергия остаётся близкой нулю.

$$A_{\text{внеш}}^{\text{min}} = W_2 - W_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 SU^2 d_2}{2d_1^2} - \frac{\epsilon\epsilon_0 SU^2}{2d_1} = \frac{\epsilon\epsilon_0 SU^2}{2d_1} \left( \frac{d_2}{d_1} - 1 \right).$$

$$A_{\text{внеш}}^{\text{min}} = \frac{2,0 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 120^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \cdot \left( \frac{2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} - 1 \right) =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 0,13 \text{ мкДж}.$$

Ответ:  $A_{\text{внеш}}^{\text{min}} = 0,13 \text{ мкДж}.$

## Раздел 5. Колебания и волны.

Колебания – это движение тела, в ходе которого оно многократно движется по одной и той же траектории и проходит при этом одни и те же точки пространства. Примерами колеблющихся объектов могут служить - маятник часов, струна скрипки или фортепиано, вибрации автомобиля.

Колебания играют важную роль во многих физических явлениях за пределами области механики. Например, напряжение и сила тока в электрических цепях могут колебаться. Биологическими примерами колебаний могут служить сердечные сокращения, артериальный пульс и производство звука голосовыми связками.

Хотя физическая природа колеблющихся систем может существенно отличаться, разнообразные типы колебаний могут быть



охарактеризованы количественно сходным образом. Физическая величина, которая изменяется со временем при колебательном движении, называется **смещением**. **Амплитуда** представляет собой максимальное смещение колеблющегося объекта от положения равновесия. **Полное колебание, или цикл** – это движение, при котором тело, выведенное из положения равновесия на некоторую амплитуду, возвращается в это положение, отклоняется до максимального смещения в противоположную сторону и возвращается в свое первоначальное положение. **Период колебания  $T$**  – время, необходимое для осуществления одного полного цикла. Число колебаний за единицу времени – это **частота колебаний**.

### Простое гармоническое колебание

В некоторых телах при их растяжении или сжатии возникают силы, противодействующие этим процессам. Эти силы прямо пропорциональны длине растяжения или сжатия. Таким свойством обладают пружины. Когда тело, подвешенное к пружине, отклоняют от положения равновесия, а потом отпускают, его движение представляет собой простое гармоническое колебание.

Рассмотрим тело массой  $m$ , подвешенное на пружине в положении равновесия. Смещая тело вниз, можно вызвать колебание тела. Если – смещение тела от положения равновесия, то в пружине возникает сила  $F$  (сила упругости), направленная в противоположную смещению сторону. В соответствии с законом Гука, сила упругости пропорциональна смещению  $F_{\text{упр}} = -k \cdot S$ , где  $k$  – константа, которая зависит от упругих свойств пружины. Сила является отрицательной, поскольку она стремится вернуть тело в положение равновесия.

Действуя на тело массой  $m$ , сила упругости придает ему ускорение вдоль направления смещения. Согласно закону Ньютона  $F = ma$ , где  $a = d^2S/d^2t$ . Для упрощения последующих рассуждений пренебрежем трением и вязкостью в колеблющейся системе. В таком случае амплитуда колебаний не будет изменяться со временем.

Если не действуют никакие внешние силы (даже сопротивление среды) на колеблющееся тело, то колебания осуществляются с определенной частотой. Эти колебания называются свободными. Амплитуда таких колебаний остается постоянной.

Таким образом,  $m \cdot d^2S/d^2t = -k \cdot S$  (1). Перемещая все члены равенства и деля их на  $m$ , получим уравнения  $d^2S/d^2t + (k/m) \cdot S = 0$ , а затем  $d^2S/d^2t + \omega_0^2 \cdot S = 0$  (2), где  $k/m = \omega_0^2$

Уравнение (2) является дифференциальным уравнением простого

гармонического колебания.  
Решение уравнения (2) дает две функции:  
 $S = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  (3) и  $S = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  (4)

Таким образом, если тело массой  $m$  осуществляет простые гармонические колебания, изменение смещения этого тела от точки равновесия во времени осуществляется по закону синуса или косинуса.

$(\omega_0 t + \varphi_0)$ - фаза колебания с начальной фазой  $\varphi_0$ . Фаза является свойством колебательного движения, которое характеризует величину смещения тела в любой момент времени. Измеряется фаза в радианах.

Величина называется угловой, или круговой, частотой. Измеряется в радианах, деленных за секунду  $\omega_0 = 2\pi\nu$  или  $\omega_0 = 2\pi/T$  (5)

График уравнения простого гармонического колебания представлен на Рис. 1. Тело, первоначально смещенное на расстояние  $A$  – амплитуды колебания, а затем отпущенное, продолжает колеблется от  $-A$  и до  $A$  за время  $T$  - период колебания.

### Ультразвук

**История открытия ультразвуковых колебаний** связано с именем итальянского естествоиспытателя Лазаро Спалланцани. Он обратил внимание на то, что летучие мыши свободно летают в абсолютно тёмной комнате не задевая предметов. В своём опыте он ослепил несколько животных, однако и после этого они летали наравне со зрячими. Коллега Спалланцани Ж. Жюрин провёл другой опыт, в котором залепил воском уши летучих мышей, зверьки натыкались на все предметы. Отсюда учёные сделали вывод, что летучие мыши ориентируются по слуху. Однако эта идея была высмеяна современниками, поскольку ничего большего сказать было нельзя. Короткие ультразвуковые сигналы в то время невозможно было зафиксировать. Со временем другие исследователи опирались на работу Спалланцани. Впервые идея об активной звуковой локации у летучих мышей была высказана в 1912 году Х. Максимом. Он предполагал, что летучие мыши создают низкочастотные эхолокационные сигналы взмахами крыльев с частотой 15 Гц.

Об ультразвуке догадался в 1920 году англичанин Х. Хартридж, воспроизводивший опыты Спалланцани. Подтверждение этому нашлось в 1938 году благодаря биоакустику Д. Гриффину и физику Г. Пирсу. Гриффин предложил название эхолокация для именованя способа ориентации летучих мышей при помощи ультразвука.

Лазаро Спалланцани – первооткрыватель ультразвука. Он не знал, что летучие мыши испускали свой собственный звук для ориентации, который он

или другой человек не мог слышать. Спалланцани смог заключить, что существа используют свои уши для навигации по окружающей среде.

В 1942 году австрийский невролог Карл Дуссик стал первым, кто использовал ультразвуковые волны в качестве диагностического инструмента. Он пропустил ультразвуковой луч через человеческий череп в попытках обнаружить опухоли головного мозга. Уже тогда стало ясно, что эта инновационная на то время технология имеет огромные возможности.

Ультразвуковая технология и ее применение в здравоохранении продолжают развиваться. Совершенствование инструментов и совершенствование процедур происходят каждый день. Совсем недавно портативные сканеры меньшего размера стали более распространенными и помогли еще больше интегрировать использование ультразвука в большее количество областей и этапов лечения пациентов.

**Ультразвук** - механические колебания, находящиеся выше области частот, слышимых человеческим ухом (обычно 2 кГц). Ультразвуковые колебания перемещаются в форме волны, подобно распространению света.

В настоящее время лечение ультразвуковыми колебаниями получили очень большое распространение. Глубина проникновения ультразвука в ткани при ультразвуковой терапии составляет от 20 до 50 мм, при этом ультразвук оказывает механическое, термическое, физико-химическое воздействие, под его влиянием активизируются обменные процессы и реакции иммунитета. Ультразвук используемых в терапии характеристик обладает выраженным обезболивающим, спазмолитическим, противовоспалительным, противоаллергическим и общетонизирующим действием, он стимулирует крово-лимфообращение. Специальными приборами ультразвук можно сфокусировать и точно направить на небольшой участок ткани - например, на опухоль. Под действием сфокусированного луча высокой интенсивности, местно, клетки нагреваются до температуры 42°C. Раковые клетки начинают гибнуть при повышении температуры, и рост опухоли замедляется.

### **Применение ультразвука в медицине.**

**Области применения ультразвука в медицине** чрезвычайно широки. В диагностических целях его используют для выявления заболеваний органов брюшной полости и почек, органов малого таза, щитовидной железы, молочных желез, сердца, сосудов, в акушерской и педиатрической практике.

Помимо широкого использования в диагностических целях, ультразвук применяется в медицине как лечебное средство. Ультразвук обладает действием: противовоспалительным, рассасывающим, анальгезирующим, спазмолитическим, кавитационным усилением проницаемости кожи. Фонофорез — сочетанный метод, при котором на ткани действуют ультразвуком и вводимыми с его помощью лечебными веществами (как медикаментами, так и природного происхождения). Проведение веществ под действием ультразвука

обусловлено повышением проницаемости эпидермиса и кожных желез, клеточных мембран и стенок сосудов для веществ небольшой молекулярной массы.

**Акушерство.** Акушерство – та область медицины, где эхо-импульсивные ультразвуковые методы наиболее прочно укоренились как составная часть медицинской практики.

**Офтальмология.** Ультразвук удобен для точного определения размеров глаза, исследования патологии и аномалий структур глаза в случае их непрозрачности и недоступности для обычного оптического исследования. Здесь важна точность работы и калибровки аппаратуры, необходимо также уделить особое внимание эффектам, связанным с преломлением ультразвука в хрусталике и роговице.

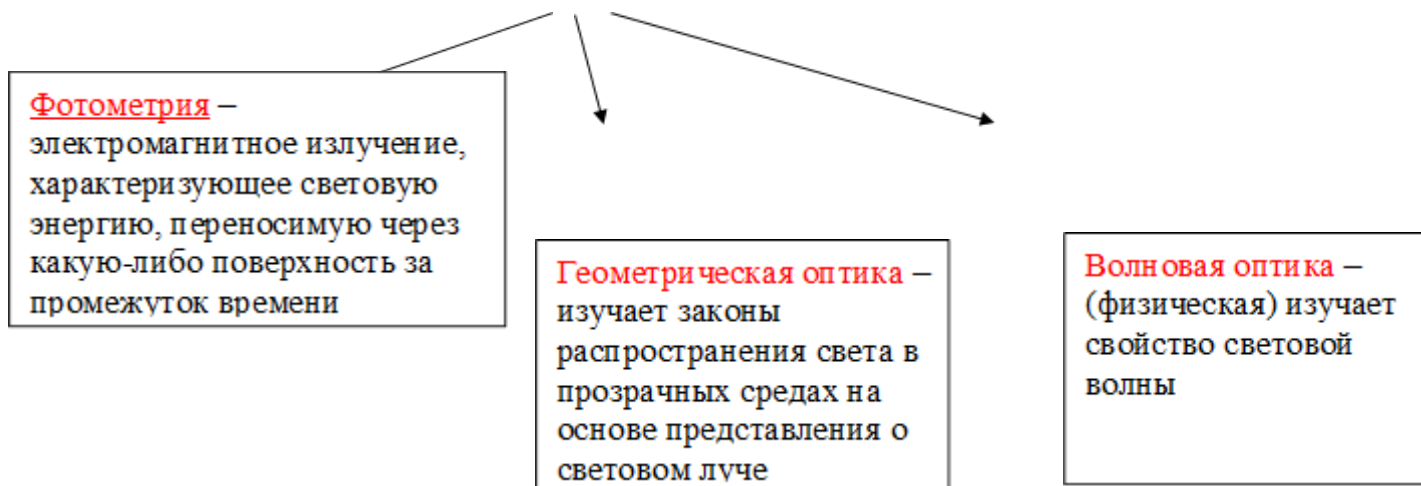
Область позади глаза – орбита – доступна ультразвуковому обследованию через глаз, Структуры орбиты имеют малые размеры и требуют хорошего пространственного разрешения и разрешения по контрасту, что достижимо на высоких частотах.

**Исследования внутренних органов.** Ультразвуковые волны, отражаясь от тканей, в виде эхо сигналов поступают в специальную медицинскую установку, благодаря чему на мониторе выводится черно-белая картина — отображение среза исследуемого органа. Данная процедура дает возможность провести комплексное исследование внутренних органов: печени, почек, селезенки поджелудочной железы, желчного пузыря, сосудов. Метод ультразвуковой эхолокации позволяет исследовать почки, мочевой пузырь, мочевыводящие пути. Ценную информацию он дает также травматологам. При помощи ультразвукового обследования можно выявить не только переломы и трещины костей, но и минимальные изменения костных структур при функциональном нарушении плотности костной ткани - остеопорозе. Эхография помогает выявить внутреннее кровотечение и кровоизлияние при закрытых травмах груди и живота.

Ультразвуковой скальпель является первым ультразвуковым хирургическим прибором, предназначенным для пересечения и коагуляции тканей. При использовании ультразвукового скальпеля пациент не подвергается воздействию электрического тока, поэтому полностью отсутствуют риски, обусловленные прямым воздействием электричества. Ультразвуковой скальпель с успехом используется тысячами хирургом по всему миру, благодаря своим преимуществам.

ОПТИКА - Это раздел физики, изучающий световые явления, выясняющей природу света, устанавливающий свойства света, изучающий его излучения, распространение и взаимодействие с вещества.

## Оптика



### I. Геометрическая оптика.

Основным законом является:

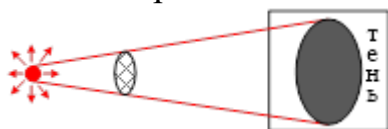
#### 1) Закон о прямолинейном распространении света:

- свет распространяется прямолинейно и равномерно;
- распространение света происходит в однородной среде;
- свет распространяется лучами;

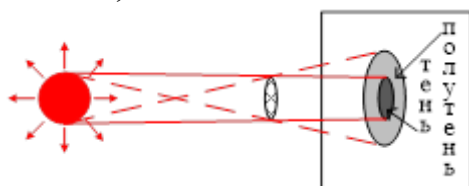
Световой луч – линия, указывающая направление распространения световой энергии.

С помощью прямолинейного распространения можно объяснить образование тени и полутени.

Образование тени – тень получается при малых размерах источника.



Образование полутени – создается, если размеры источника света больше, чем тела.



Скорость света можно определить с помощью:

- а) метод Ренера (астрономический) – 1676г.  $v=300000$  км/с
- б) метод Физо (лабораторный) – 4899г.

$$c = \frac{2l\omega Z}{2\pi}$$

$Z$  – количество зубьев в колесе

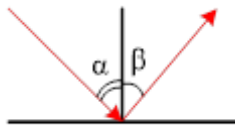
$\omega$  – угловая скорость колеса

$l$  – расстояние от зубчатого колеса до зеркала

$$v = 313000 \text{ км/с}$$

$$c = 299792456,2 \pm 0,8 \text{ м/с}$$

### 2) Законы отражения света:

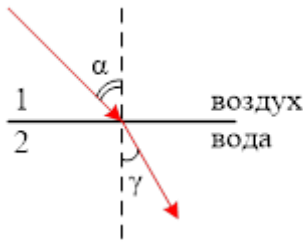


- луч падающий и отраженный лежат в одной плоскости вместе с перпендикуляром, восстановленным в точке падения луча;

- угол падения равен углу отражения.  $\alpha = \beta$

### 3) Законы преломления:

- (1) падающий луч и преломленный лежат в одной плоскости вместе с перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения луча;



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \text{const}$$

- (2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух двойных сред.

Отражение и поглощение светового луча зависит от рода вещества, состояния поверхности, состава излучения и угла падения.

Отражение света делят:

1. Диффузное или рассеянное (пучок света падает, а отражается в разные стороны).

Это отражение позволяет видеть предметы.



2. Зеркальное отражение – пучок света падает и отражается.

### Плоское зеркало.



Очень часто изображение предмета зависит от поверхности зеркала. Зеркало с неровной поверхностью называют сферическим. Оно представляет поверхность шарового сегмента (кусочек), зеркально отражающую свет. И если отражение идет от внутренней поверхности, то зеркало вогнутое, если от внешней, то зеркало выпуклое:

$d$  – расстояние от предмета до зеркала  
 $f$  – расстояние от изображения до зеркала  
 $F$  – фокусное расстояние

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

У

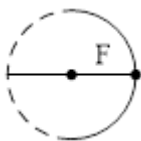
сферической

поверхности определяют такие же характеристики, как у линзы:

- формула вогнутого зеркала
- Формула тонкой линзы

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}$$

- для выпуклого зеркала



$$D = \frac{1}{F}$$

- формула оптической силы

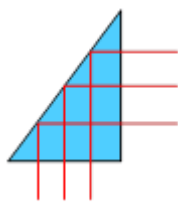
$h$  – предмет

$H$  – изображение

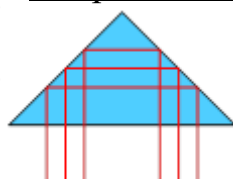
$\Gamma$  – линейное увеличение

### Полное отражение.

При увеличении угла падения, преломленный луч исчезает. Возникает полное отражение луча. Угол падения, которому соответствуют преломления  $90^\circ$ , называют предельным углом падения. Явление полного отражения используют в призмах и волоконной оптике – световоды (это стеклянное полотно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с показателем преломления меньше, чем у волокна; они направляют свет по изогнутому пути).



Направление света могут изменить призмы:

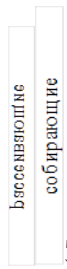


• оборачивающая:

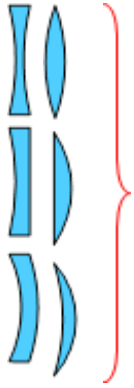
• поворотная:

Используют в перископах, зеркалах.

### Линзы.



Это прозрачное тело ограниченное двумя сферическими поверхностями. Бывают выпуклые (собирающие) и вогнутые (рассеивающие).



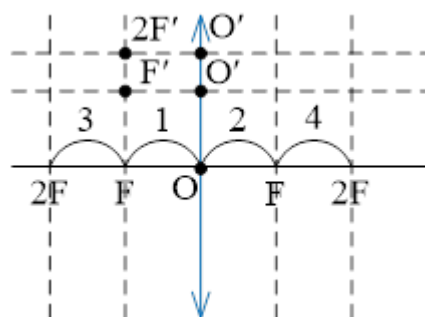
двояко-выпуклая  
двояко-вогнутая

- плоско-вогнутая  
плоско-выпуклая
- вогнутая  
выпуклая

Собирающие – положительные, рассеивающие – отрицательные.

Линзы могут быть собирающие или рассеивающие, если показатель преломления линзы больше показателя преломления среды, в котором линза используется.

### Характеристики:



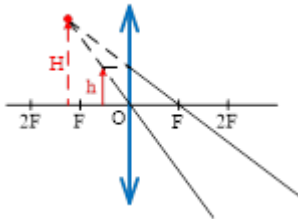
- O – главный оптический центр линзы;
- —• — главная оптическая ось;
- $S_1 = S_2 = S_3 = S_4$ ;
- через F проходят фокальные плоскости;
- на фокальных плоскостях лежат побочные фокусы;
- через побочные фокусы проходят побочные оптические оси;
- на пересечение побочных осей с линзой возникают побочные центры;
- $D = \frac{1}{F}$  – сила линзы; F – фокусное расстояние линзы;
- $D = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ ; n – показатель преломления;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы линз;



- $D = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$  – формула тонкой линзы;
- $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$ .

## Построение изображения в линзе.

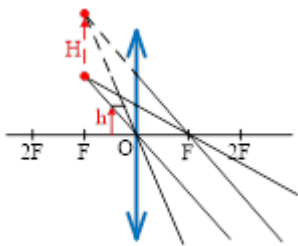
### I. Собирающие линзы:



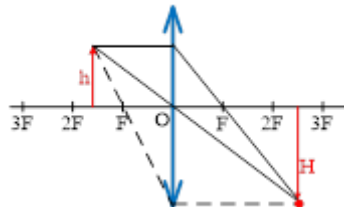
1. Предмет между F и линзой.

2. Предмет на главной оптической оси.

Изображение мнимое, прямое, находится по ту же сторону от линзы, что и предмет



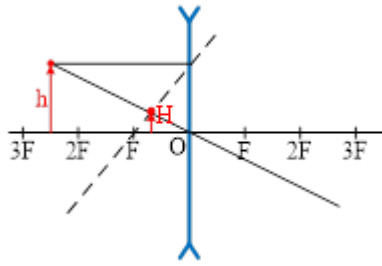
3. Предмет между 2F и F.



4. Предмет за 2F.

Изображение перевернутое, по другую сторону от линзы, увеличенное, действительное

Изображение перевернутое, уменьшенное, действительное, по другую сторону от линзы



II. Рассеивающая:

## III. Волновая оптика.

Изображение прямое, уменьшенное, мнимое, расположено по ту же сторону, что и предмет

**1) Дисперсия** – явление зависимости показателя преломления вещества от  $\nu$  или  $\lambda$  электромагнитных волн.

Следствием дисперсии является разложение белого света на различные цвета. Их семь: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Первым изучал дисперсию Ньютон. Для этого он использовал треугольную призму из стекла и пучок солнечного света. Чем больше показатель преломления, тем больше проявление дисперсии.

Среда, в которой наблюдается явление дисперсии, называется **диспергирующей** средой.

И преломление, и дисперсия объясняют взаимодействие электромагнитных волн с веществом. При прохождении электромагнитных волн через вещество, электроны в атомах и молекулах начинают колебаться, постепенно теряя энергию на излучение электромагнитной волны. Вторичные волны, излучаемые электронами, складываются с первичной волной, образуя результирующую волну, фаза первичной и вторичной волн различаются, следовательно, скорость результирующей волны отлична от скорости волны в вакууме. Это различие бывает сильнее, если вынужденные колебания больше.

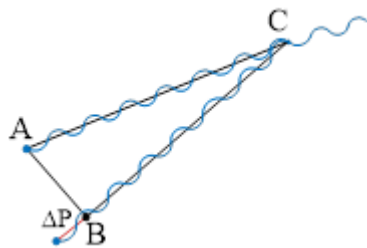
Так как электроны имеют свою частоту, то чем ближе частота электронов и частота падающей волны, тем больше разница скоростей распространения волн. При выходе луча из призмы, частота не изменяется, а изменяется только длина волны. Дисперсию определяют с помощью приборов – спектроскопов и спектрографов. Они помогают получить и использовать спектр.

**2) Интерференция** – явление, возникающее при наложении двух и более когерентных волн (волны с одинаковым периодом (T)).

При наложении волн возникают усиления или ослабления (условия Максимума или Минимума).

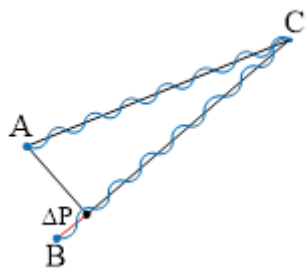
У волн одинаковая  $\Delta f$  и  $\nu$ .

Впервые когерентную волну получил в 1802 г. Юнг.



### I. Условия Максимума.

В результирующей точке C происходит результирующее смещение, оно зависит от разности хода двух волн. Если  $\Delta$  хода равна условному числу волн (четному числу полуволен), то выполняются условия Максимума.  $\Delta P = R \cdot \lambda$ ,  $R$  – кв. число,  $\Delta P$  – расстояние между волнами.



### II. Условия Минимума.

Если волны приходят в точку C в противофазе, то они гасят друг друга. При этом  $\Delta P$  равна нечетному числу полуволен.

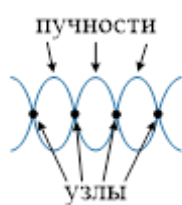
$$\Delta P = \frac{(2R + 1) \cdot \lambda}{2}$$

При условии максимума после точки C происходит увеличение энергии в 4 раза, а амплитуды в 2 раза.

Интерференция присуща волнам любой природы. Интерференция падающей и отраженной волны приводит к возникновению стоячей волны, которая выглядит неподвижно. Устойчивость стоячей волны удовлетворяет условию:

$$l = \frac{R \cdot \lambda}{2}$$

, где  $l$  – расстояние, на которое распространяется волна

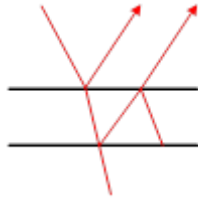


Стоячие волны возникают в любых телах, способных совершать колебания. Образование стоячих волн – это резонансное явление.

Точки, где интерференция гасится, называют узлами. А там, где усиливаются – пучностями.

### Интерференция света в тонких пленках.

Различные цвета тонких пленок – это результат сложения двух волн, отражающихся от нижней и верхней поверхностями пленки.



Интерференцию можно наблюдать в тонких прослойках воздуха между двумя стеклянными поверхностями. Получаются кольца Ньютона.

$$r = \sqrt{k \cdot \lambda \cdot R}$$

### Использование интерференции в технике:

1. Интерферометры – служат для точного измерения показателя преломления газов и других веществ, а также длины световой волны.

2. Просветление оптики: различные объективы отражают около 5% падающего света. Чтобы уменьшить долю отраженной энергии, на поверхность оптической плоскости наносят тонкую пленку с таким показателем преломления, чтобы выполнялось условия минимума. Если амплитуда колебаний одинаковая, то гашение света будет полным. Хуже всего ослабляются лучи красного и фиолетового цвета, поэтому на объективе появляется сиреневый оттенок.

3. Дифракция – совокупность явлений, наблюдаемых при распространении электромагнитных волн в среде с резко выраженными неоднородностями. Характерная особенность – отклонение световой волны на резких неоднородностях среды. Объяснить это можно с помощью принципа Гюйгенса - Френеля.

Принцип заключается в том, что волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции.

### Законы Френеля.

$$r_1 = r_0 + \frac{\lambda}{2}$$

Первая зона Френеля ограничена точками волновой поверхности, расстояние между которыми равно:

,  $r_0$  – начальное/наименьшее расстояние от источника колебаний до волновой поверхности

$$r_2 = r_1 + \frac{\lambda}{2} = r_0 + \lambda$$

Все последующие зоны изменяются на половину  $\lambda$  волны.

Дифракционные явления наблюдаются, когда размеры препятствий сравнимы с длиной волны. Дифракция происходит на предметах различных.

Дифракционная решетка – устройство, состоящее из большого числа полосок регулярно расположенных на определенном расстоянии. Она представляет собой пластинку из хорошо отполированного стекла.

Главной характеристикой решетки является:  $T(d) = a + b$ ,  $a$  – ширина одной щели;  $b$  – ширина непрозрачной части.

$$P \sin f = \frac{(2R + 1) \cdot \lambda}{2}$$

По принципу Гюйгенса – Френеля любая щель – источник вторичной волны. Для максимума дифракционной решетки выполняется условие:  $P \sin f = R\lambda$ ,  $f$  – угол отклонения  
Для минимума:

С увеличением щелей уменьшается ширина световых интерферентных полос, увеличивается их интенсивность и ширина темных промежутков между ними.

#### 4. Поляризация:

Свет, испускаемый лампой накаливания, не поляризован.

Пройдя сквозь первый кристалл турмалина, свет становится плоско поляризованным. Второй кристалл регулирует прохождение этого света. Поворот второй пластины относительно первой приводит к изменению интенсивности света. Первый кристалл – поляризатор, второй – анализатор. Если они перпендикулярны друг другу, то свет не проходит. Поляризация присуща только поперечным волнам.

Свойством поляризации обладают поляроиды в виде тонкой пленки гиропатидов, нанесенных.

Поляризованный свет:

1. Регулировка освещенности.
2. Гашение зеркальных бликов на фотографии.
3. Предупреждение ослепления водителя.
4. Геология, археология и т.д.

Границы применения:

1. На расстояниях больше размера предмета проявляются волновые свойства света.
2. Интерференция картины от разных точек предмета смазывается, поэтому нет четкости предмета.
3. Дифракция устанавливает разрешающую способность любого оптического прибора.

## Раздел 7. Квантовая физика.

Причиной возникновения квантовой физики является то, что в начале XX века в физике возник кризис - появились проблемы. Существующие классические теории, в том числе теория Максвелла, уже не могли решать научные проблемы физики.

Одна из них - это тепловое излучение. Тела, излучающее тепло, должны отдавать свое тепло окружающим телам и среде и прийти к термодинамическому равновесию, т.е. равенству температур. Это является основным принципом термодинамики. Однако при излучении, например Солнца, с температурой 6000 К, не происходит такого явления. Также энергия излучения одинакова во всех длинах волн и подчиняется закону распределения, независимого от конкретной температуры. Это означает, что доля энергии излучения, соответствующая каждой длине волны, оказывается разной. В этой зависимости основная максимальная энергия излучения зависит от температуры и изменяется по закону смещения Вина:

$$\lambda_m T = b.$$

**Закон смещения Вина**

утверждает, что длина волны  $\lambda_{\text{макс}}$ , на которую приходится максимум энергии, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$

**излучающего**

**тела:**  $\lambda_m = \frac{b}{T}.$

Например, максимальная энергия излучения Солнца приходится на зеленый свет ( $\lambda = 470$  нм). Это по закону Вина соответствует  $T = 6300$  К. Энергетическое распределение этого излучения разработал Релей-Жинс на основе закона классической статистической механики, согласно закону термодинамики - равномерного распределения по степени свободы энергии молекул. Он объяснял распределение существующее только на длинных волнах, а для коротких волн это объяснение противоречило результатам эксперимента.

Еще одна из научных проблем, возникших к началу XX века, - это объяснение линейности спектров излучения газов и паров металла. Открытие явления фотоэффекта, наличия давления света, рассеяния световых лучей на электронах и другие научные проблемы, которые классическая физика, в частности электромагнитная теория Максвелла, также не смогла объяснить.

Для решения этих проблем немецкий ученый М. Планк выдвинул новую противоречивую классической физике идею. Он представил себе, что излучения и поглощения нагретого тела не происходят непрерывно, а происходят отдельными порциями (квантами). Квант - это минимальная порция энергии поглощения или излучения телом.

**Согласно теории Планка, энергия кванта прямо пропорциональна частоте света:**

$$E = h\nu, \quad (6-2)$$

здесь:  $h$  - постоянная Планка,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж. · с. Планк объяснил, что излучение и поглощение света происходит прерывно, создал закон распределения энергии излучения по длине волны, который и решил накопившиеся научные проблемы.

Он также объяснил (на примере Солнца) условия существования излучающих тел и необязательность термодинамического равновесия.

### **Фотоэлектрический эффект**

Фотоэлектрический эффект (сокращенно - фотоэффект) был открыт в 1887 году Г. Герцем и экспериментально изучен русским ученым А. Столетовым (независимо от Ф. Ленарда).

**Внешний фотоэффект - это выход электронов из вещества под воздействием света.**

Схема экспериментальной установки, используемой для изучения явления фотоэффекта, приводится на рис. 6.1.

Основа устройства состоит из стеклянного баллона с «окошком», изготовленного из кварца, имеющего два электрода: анод и катод. Внутри стеклянного баллона создается вакуум, так как в вакууме электроны и другие частицы могут совершать прямолинейные движения.

Чтобы подавать напряжение (от 0 до  $U$ ) электродам через потенциометр, источник тока соединен через удвоенный ключ  $K$ . Удвоенный ключ дает



ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕНЯТЬ ПОЛЮС ИСТОЧНИКА ТОКА И ЗАМЫКАТЬ ЦЕПЬ.

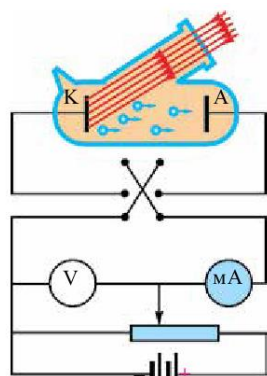


Рис. 6.1.

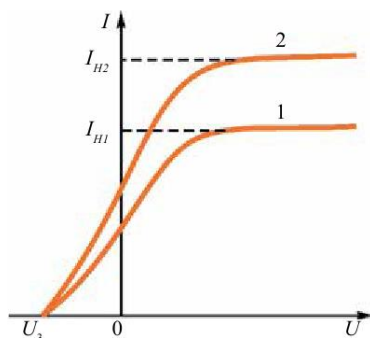


Рис. 6.2.

Один из электродов - катод (в основном, катод из цезия) через кварцевое «окно» освещается монохроматическими волнами. При постоянной длине волны и постоянном световом потоке измеряется зависимость силы фототока от напряжения, приложенного к аноду.

На рис. 6.2 приводится типичный график зависимости силы фототока от напряжения. График 2 соответствует большему световому потоку, чем график

1. Здесь:  $I_{1T}$  и  $I_{2T}$  - ток насыщения,  $U_{\text{зад}}$  - задерживающее напряжение, т.е. при подаче такого отрицательного напряжения фотоэлектроны с начальными скоростями не доходят до анода.

Из графика на рис. 6.2 видно, что при больших положительных значениях напряжения сила тока достигает насыщения. Т.е. все электроны, которые покидают катод, доходят до анода. Когда напряжение доходит до

значения  $U_{\text{зад}}$ , фототок равняется нулю. Измеряя для данного катода значение задерживающего напряжения, можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$E_{\text{к макс}} = \frac{5}{8} = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} = eU_{\text{зад}}. \quad (6-3)$$

Ф. Ленард на своих опытах показал, что задерживающий потенциал не зависит от интенсивности (светового потока) падающей волны, а линейно зависит от

частоты падающего света (рис. 6.3).

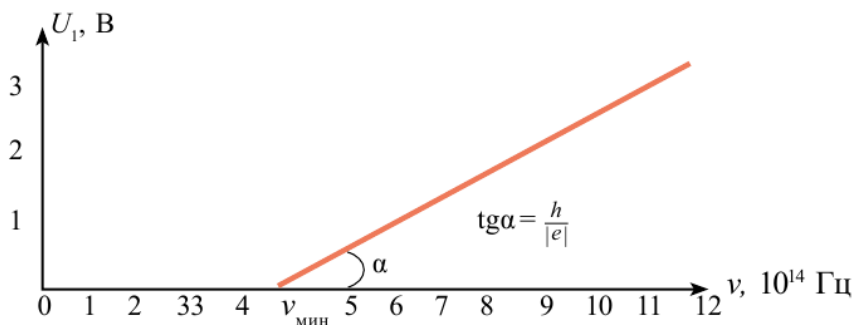


Рис. 6.3.

На основе опытов открыли **законы фотоэффекта**:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от светового потока (интенсивности) и линейно зависит от частоты  $\nu$  падающего света (с увеличением  $\nu$  линейно увеличится  $I$ ).
2. Для каждого вещества существует минимальная частота  $\nu_{\text{мин}}$ , при которой происходит фотоэффект. Это называется красной границей фотоэффекта.
3. Количество фотоэлектронов, вылетающих из катода за единицу времени, прямо пропорционально падающему на катод световому потоку (интенсивности) и не зависит от частоты.

Явление фотоэффекта - это явление без инерции, в момент приостановки светового потока тут же исчезает фототок, с поступлением света фототок появляется.

### Теория фотоэффекта

Теория фотоэффекта обоснована в 1905 году А. Эйнштейном. Он, пользуясь гипотезами М. Планка, пришел к выводу, что электромагнитные волны тоже состоят из отдельных порций - квантов. Они позже начали называться фотонами.

По идее Эйнштейна, при взаимодействии фотона с веществом он свою энергию  $h\nu$  полностью отдает электрону. По закону сохранения энергии, часть этой энергии расходуется на выход электрона из вещества и оставшаяся часть превращается в кинетическую энергию электрона:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (6-4)$$

Это называется уравнением *Эйнштейна* для фотоэффекта.

Здесь  $A$  - выполненная работа для выхода электрона из вещества. Если учесть, что максимальная кинетическая энергия электрона равна

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\text{макс}} = eU_{\text{зад}},$$

уравнение Эйнштейна для фотоэффекта можно записать в следующем виде:

$$h\nu = A + eU_{\text{зад}}.$$

Данное уравнение для фотоэффекта выражает закон сохранения энергии для явления фотоэффекта. Этот закон объясняет факты, касающиеся фотоэффекта:

1. максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты и не зависит от интенсивности (светового потока) падающего луча;
2. существование красной границы фотоэффекта, т.е.  $h\nu_{\text{мин}} = A$ ;
3. фотоэффект происходит без инерции. По уравнению Эйнштейна, количество фотоэлектронов, вылетающих из катода за 1 с, пропорционально количеству фотонов, падающих на эту площадь.

На основании уравнения Эйнштейна следует, что  $\text{tg} \alpha$  угла наклона графика зависимости задерживающего потенциала от частоты равен отношению постоянной Планка на заряд электрона (рис 6.3), т.е.

$$\text{tg} \alpha = \frac{h}{|e|}. \quad (6-5)$$

Это отношение даст возможность определять постоянную Планка экспериментальным путем. Такой эксперимент проведен в 1914 году Р. Милликеном, который определил постоянную Планка. Этот эксперимент позволил найти работу выхода фотоэлектрона:

$$A = h\nu_{\text{мин}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_0}.$$

Здесь:  $c$  - скорость света,  $\lambda_0$  — длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта.

Для катодов работа выхода измеряется в электрон-вольтах (эВ) (1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж). Поэтому используется значение постоянной

Планка, выраженное в эВ:  $h = 4,136 \cdot 10^{-15}$  эВ · с.

Среди щелочных металлов Na, K, Cs, Rb имеют малую работу выхода. Поэтому на практике для покрытия поверхности катода используются оксиды этих металлов и другие соединения. Например: работа выхода катода цезиевым

оксидом  $A = 1,2$  эВ, красная граница фотоэффекта, соответствующая этому  $\lambda_0 \approx 10,1 \cdot 10^{-7}$ . Это широко используется для регистрации желтого - видимого света.

### Внутренний фотоэффект

При облучении полупроводников световым излучением слабо связанные электроны поглощают фотоны и превращаются в свободные электроны. При этом в полупроводниках увеличивается концентрация свободных носителей заряда и электропроводимость полупроводника.

**Появление свободных носителей заряда в полупроводниках в результате воздействия излучения называется внутренним фотоэффектом.**

Созданная дополнительная электрическая проводимость в полупроводниках в результате воздействия излучения называется **фотопроводимостью**. Это применяется при производстве фотосопротивления. Фотосопротивление - это сопротивление, которое изменяется под воздействием света. В радиотехнике его называют **фоторезистором**.

### Фотоны

По квантовой теории света, при поглощении и излучении светового излучения веществом свет проявляет себя как поток частиц. Эта частица света называется **фотоном**, или **световым квантом**. Энергия фотона равна:  $E = h\nu$ . Фотон движется в вакууме со скоростью света  $c$ . Фотон не обладает массой покоя, т.е.  $m_0 = 0$ .

Используя формулу из теории относительности  $E = mc^2$ , можно определить массу фотона при движении:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (6-6)$$

В большинстве случаев энергия фотона  $h\nu$  выражается не через частоту, а через циклическую частоту:  $\omega = 2\pi\nu$ . При этом используют

выражение:  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  читается как «аш с черточкой».

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Значение

Рассмотрение света как потока частиц - фотонов считается корпускулярной теорией и это нельзя назвать как возврат в механику Ньютона. Ее законы движения подчиняются законам квантовой механики.

К началу XX века стало известно, что природа света имеет две природы. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция,

дифракция, поляризация), при взаимодействии с веществами проявляются его корпускулярные свойства (частицы) (фотоэффект, давление света и т.д.).

Эти свойства стали называть **корпускулярно-волновым дуализмом**. Позже науке стало известно, что потоки электронов, протонов, нейтронов тоже имеют волновые свойства.

На этой основе получили объяснение процессы излучения и поглощения света веществом, линейных спектров, явления фотоэффекта, давления света и другие.

### **Импульс фотона и давление света**

Из-за того что фотон всегда находится в движении, он имеет импульс:

$$p = m \cdot c.$$

Если учесть вышеприведенное выражение, то импульс фотона

равняется 
$$p = \frac{h\nu}{c}$$

Учитывая формулу  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , энергию и импульс фотона выражаем через длину волны:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \text{ и } p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (6-7)$$

Если на поверхность тела попадает поток фотонов, тогда эти фотоны передают ей импульс и образуется давление света.

Согласно электромагнитной теории Максвелла, когда свет падает на какую-либо поверхность, на нее действует давление. Однако это давление имеет очень маленькое значение. По расчетам Максвелла, солнечный свет, падающий на Землю, создает силу давления 0,48 мкН на абсолютно черной части площадью  $1 \text{ м}^2$ . Регистрировать такую маленькую силу на открытом земном участке очень сложно.

Первый раз давление света экспериментально измерил русский ученый П.Н. Лебедев в 1900 году. Для этого он изготовил очень легкое устройство. Одну или несколько пар легких крылышек, одно блестящее, а другое затемненное, прикрепили к веревке. Опыт показывает, что блестящее хорошо отражает свет, а затемненное хорошо поглощает.

Систему поместили в сосуд, из которого выкачали воздух. Она представляла собой чувствительные крутильные весы. Поворот системы наблюдается через зеркало и трубку, прикрепленную к веревке. По углу поворота системы определяется сила давления света, действующая на систему.

Результаты Лебедева подтвердили электромагнитную теорию Максвелла. Измеренное давление света имело разницу на 20% от теоретически вычисленного значения давления света. Позже, в 1923 году, в проведенных

опытах Герлаха полученный результат по давлению света от теоретических вычислений отличался на 2%.

Формулу давления, оказывающего на поверхность потоком фотонов, можно вывести следующим образом. Сила действия в результате

$$F_1 = \frac{\Delta(mc)}{\Delta t}.$$

столкновения фотона с поверхностью равна : Если ударится

$N$  шт. фотонов, тогда 
$$F_k = NF_1 = \frac{N\Delta(mc)}{\Delta t}.$$

Здесь:  $\Delta(mc)$  - изменение импульса фотона. Оно будет равно  $\Delta(mc) = 2mc$ , если поверхность идеально прозрачная, если абсолютно черная, то будет равно  $\Delta(mc) = mc$ .

Тогда давление, оказанное на абсолютно черную поверхность,

$$P_1 = \frac{F}{S} = \frac{N\Delta(mc)}{S \cdot \Delta t}.$$

Если поверхность блестящая, то 
$$P_1 = \frac{N \cdot 2mc}{S \cdot \Delta t}.$$

Если в  $E = mc^2$  учесть, что 
$$mc = \frac{E}{c}, P = \frac{NE}{c \cdot S \cdot \Delta t}.$$

Здесь  $\frac{NE}{S \cdot \Delta t} = I$  энергия света (волны), падающая за единицу времени на единицу площади, называется интенсивностью света (волны).

Тогда  $P = \frac{I}{c}$ . Эта формула Максвелла по определению давления, оказываемого на поверхность вещества (абсолютно черная поверхность) электромагнитными волнами.

Из приборов, работающих на основе явления фотоэффекта, самое широко применяемое - это фотосопротивление.

Основу фотосопротивления составляет полупроводник, чувствительный к свету, имеющий относительно большую площадь. Его схема и условное

обозначение приводится на рис. 6.4.

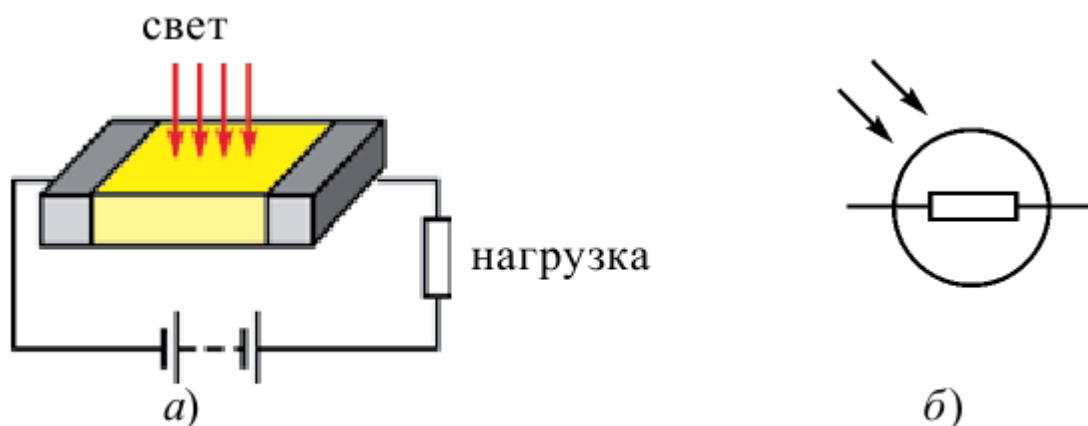


Рис. 6.4.

свет

При комнатной температуре сопротивление полупроводника очень большое и через него протекает очень маленький ток. С падением на него света увеличится концентрации свободных носителей заряда, сопротивление уменьшится. Сила тока растет.

Преимущества фотосопротивления: высокая фоточувствительность, долгосрочная эффективная служба, маленький размер, несложная технология изготовления, возможность изготовления из полупроводниковых материалов, работающих на одинаковых длинах волны.

К недостаткам можно отнести: первое - изменение сопротивления линейно не зависит от светового потока, второе - чувствительность к температуре. В том числе имеет большую инертность, появляется ряд проблем при использовании на высоких частотах.

### Фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте

Основанные на внутреннем фотоэффекте полупроводниковые фотоэлементы

с  $p-n$  переходами применяются для превращения световой энергии в электрическую. Полупроводник - кремниевые фотоэлементы, позволяющие превращать солнечную энергию в электрическую, широко применяются и получили название солнечные батареи.

Основу солнечной батареи составляют кремниевые пластинки « $n$ -типа», со всех сторон окруженные тонким слоем (1-2 мкм) кремния  $p$ -типа (рис. 6.5).

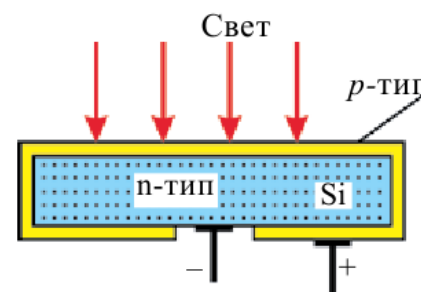


Рис. 6.5.

При падении света на поверхность элемента в слое  $p$ -типа появляется элект-ронно-дырочная

пара, которая, не успевая рекомбинировать, переходит в область  $p-n$  перехода. В области  $p-n$  перехода происходит разделение зарядов. Под действием



созданного поля электроны движутся в сторону области *n*-типа, а дырки - в сторону *p*-типа. Созданная ЭДС в среднем будет до 0,5 В. Такой элемент с площадью  $1 \text{ м}^2$ ; при подсоединении к потребителю, дает ток до 25 мА.

Чувствительность кремниевых фотоэлементов для зеленых лучей максимальна, т.е. приходится на максимальную часть солнечного света. Поэтому они имеют высокое КПД, обычно 11-12%, а в материалах высокого качества доходит до 21-22%.

Солнечные батареи служат, кроме солнечных электростанций на Земле, на космических кораблях и искусственных спутниках Земли в качестве источника электрической энергии.

Одним из широко применяемых приборов, работа которых основана на внутреннем фотоэффекте, является световой диод (полупроводниковые лазеры). Светодиоды основаны на действии одного или нескольких *p-n* переходов. Когда через них проходит электрический ток, они излучают свет. В материале этого диода количество и подвижность электронов будет больше, чем дырок. При переходе электронов из области *n* в область *p* происходит рекомбинация с дырками. Излишки энергии излучаются в виде световой волны.

В зависимости от типа материала полупроводника цвет излучения будет разный.

Академиком АН Узбекистана М. Саидовым созданы около 10 видов светодиодов и разработаны теория и технология изготовления различных светодиодов.

Если раньше фотоприборы использовались только в кинотехнике и фотоэлектронных умножителях, то сегодня они широко применяются в осветителях, робототехнике, автоматике, фотометрии, приборах ночного видения, солнечных электростанциях и научных исследованиях, проводимых с помощью светового излучения.

В целях широкого использования солнечной энергии в Узбекистане в 1993 году организовали научно-производственного объединения «Физика-Солнца» и проводятся широкомасштабные научно-исследовательские и прикладные работы.

### **Пример решения задачи**

Найдите длину волны света, падающего на поверхность, если работа выхода электрона из металла  $7,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , а кинетическая энергия электрона  $4,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ .  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ .

$$E_k = 4,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

$$A = 7,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Дано:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$       Найти:  $\lambda = ?$

$$h\nu = A + E_k$$

$$\lambda = \frac{v}{c}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = A + E_k$$

$$\lambda = \frac{hc}{A + E_k}$$

Формула:

Решение: 
$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{7,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} + 0,45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} \approx 2,46 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ:  $\lambda \approx 2,46 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$

**Итоги:**

Закон смещения Вина: Длина волны  $\lambda_{\text{макс}}$ , на которую приходится максимум излучения тела, обратно пропорциональна

абсолютной температуре  $T$  - постоянная Вина.

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \cdot b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м, К}$$

Квант: Минимальная часть энергии излучения или поглощения телом.

Энергия кванта :Энергия кванта прямо пропорциональна частоте света:  $E = h\nu$ ,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с.}$

Внешний фотоэффект: Выход электронов из вещества под воздействием света.  
Задерживающее напряжение :Отрицательное тормозящее напряжение, при котором фотоны не доходят до анода.

Законы фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от светового потока (интенсивности) и линейно зависит от частоты  $\nu$  падающего луча.
2. Для каждого вещества существует минимальная частота  $\nu_0$ , при которой происходит фотоэффект. Это называется красной границей фотоэффекта.

3. Количество фотоэлектронов, вылетающих из катода за единицу времени, прямо пропорционально падающему на катод световому потоку (интенсивности) и не зависит от частоты.

$$E_{\text{к макс}} = \frac{mv^2}{2} = eU_{\text{уп}}.$$

Максимальная кинетическая энергия электронов :

$$hv = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Формула Эйнштейна для фотоэффекта :  
Красная граница фотоэффекта : Красная граница фотоэффекта

$hv_{\text{мин}} = A$  или  $\frac{hc}{\lambda_0} = A$ .  
Здесь  $\nu_0$  или  $\lambda_0$  - частота и длина волны, соответствующие красной границе фотоэффекта.

Внутренний фотоэффект: Увеличение концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках под воздействием света.

Фотон : Квант или частица света. Его масса покоя  $m_0 = 0$ .

Энергия фотона: Энергия фотона  $E = h\nu$ , скорость движения  $c$ ,

$$p = \frac{h\nu}{c}, \text{ масса } m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

импульс

Давление света :  $p = \frac{I}{c}$ , здесь  $I$  - интенсивность света.  $c$

Фотосопротивление - фоторезистор : Резистор, у которого под воздействием света уменьшается сопротивление.

Солнечные батареи: Полупроводниковый фотоэлемент с  $p-n$  переходом основан на внутреннем фотоэффекте, который превращает световую энергию в электрическую.

## Раздел 8. Астрономия.

Происхождение Вселенной остается одной из главных загадок науки. С начала наблюдений за звездным небом человечество пыталось понять, как возникло все, что его окружает, и что там за пределами нашего мира. С развитием технологий ему покорились многие природные явления и даже просторы космоса, но никто так до сих пор и не установил, как зародилась Вселенная. Однако, астрономы выдвинули множество теорий на этот счет, некоторые из них вполне логичны и правдоподобны.

Теория большого взрыва

Основной теорией возникновения Вселенной в ее нынешнем состоянии является теория большого взрыва. Впервые этот термин был применен британским астрономом Ф. Хойлом в 1949 году. При этом сам ученый считал данное предположение о происхождении и эволюции Вселенной ошибочным.

Сами же идеи о расширении Вселенной и ее развитии в результате взрывного процесса возникли в начале 20 века. Способствовал этому Альберт Эйнштейн, опубликовавший свою теорию относительности. Нестационарное решение его гравитационного уравнения натолкнуло советского физика Фридмана на гипотезу о том, что Универсум – постоянно расширяющийся объект. По его версии, вначале она представляла собой очень плотное, однородное вещество. Оно в результате большого взрыва начало распространяться, образуя привычные нам элементы космоса – галактики, туманности, звезды, планеты и другие тела.

Теория происхождения Вселенной по Фридману неоднократно подвергалась дополнениям и улучшениям. В 1948 году астрофизик Георгий Гамов опубликовал работу, в которой описывал первичное вещество до Большого взрыва не только как очень плотное, но и как очень горячее. В нем постоянно происходили реакции термоядерного синтеза, в результате которых образовались ядра легких химических элементов. Выделяемое при этом электромагнитное излучение сохранилось до сих пор, но в остывающем виде. Теория была подтверждена почти через 20 лет после того, как ученым удалось открыть и измерить температуру космического фона. Изучение реликтового излучения также помогла установить возраст мироздания и распределение в нем вещества.

Современное представление о возникновении Вселенной

- Теория Большого взрыва – описывает то, что стало пусковым механизмом расширения первичной материи.
- Инфляционная теория – рассматривает причины расширения вещества.
- Модель расширения Фридмана – описывает процессы распределения материи в пространстве.
- Иерархическая теория – описывает возникновение всех структур космоса.

Хронология событий в теории Большого взрыва

Теория эволюции Вселенной подразумевает, что до Большого взрыва все мироздание находилось в принципиально другом состоянии. А после – проходило стадии развития, благодаря которым заполнилось частицами, химическими элементами и другими структурами. Они же послужили строительным материалом для всех космических тел и объектов. Каждая эпоха развития имеет свою продолжительность от незначительных долей секунды до миллиардов лет. Попробуем изложить теорию происхождения Вселенной кратко и простым языком.

### Эпоха сингулярности

Большому взрыву и происхождению Вселенной в современном ее виде предшествовала стадия космологической сингулярности. Это состояние Универсума, при котором вещество имеет почти бесконечные значения плотности и температуры, а само оно стремится к нулю.

Космологическая сингулярность – один из самых трудных вопросов современной науки. Невозможно точно установить, что именно было до Большого взрыва. Но бесконечная плотность раннего вселенского вещества не может сопровождаться его бесконечной температурой. Следовательно, сингулярная Вселенная противоречит современным законам физики.

По некоторым предположениям, эпохи сингулярности вообще не существовало. Еще по предположению группы ученых, в число которых входит С.Хокинг, все сущее могло возникнуть из абсолютного вакуума («ничего») из-за колебаний системы. По другой теории, Большой взрыв привел лишь к образованию Метагалактики, как «пузырька» в плотном веществе Универсума. Есть также гипотеза о том, что вселенные образуются из-за разрывов сингулярности в пределах черных дыр. Доподлинно же установить, что было до Большого взрыва, не представляется возможным.

### Планковская эпоха

Итак, в первичном мироздании произошел катастрофический процесс, в результате которого вещество начало стремительно расширяться и охлаждаться. При чем для формирования всех структур космического пространства взрыв должен был произойти повсюду. Это и является точкой отчета возникновения мироздания в его нынешнем виде.

В период от нуля до  $10^{-43}$  секунд вещество Универсума имело физические параметры (температура, энергия, плотность) соответствующие постоянным Планка. В таких условиях планковской эпохи произошло рождение частиц.

### Эпоха великого объединения

В период с  $10^{-43}$  по  $10^{-35}$  секунд после Большого взрыва в относительно устойчивой системе возникли силы гравитации. Они впоследствии способствовали возникновению звезд и планет. Первичная материя перестала быть однородно плотной. Но электромагнитное и ядерное взаимодействия в ней были еще объединены, поэтому любые физико-химические параметры для этого вещества не имеют смысла.

### Эпоха инфляции

При переходе в эту стадию эволюции Вселенная начала ускоренно расширяться. Это позволило перераспределиться высокоплотному изотропному первичному веществу. Эпоха заняла промежуток времени с  $10^{-35}$  по  $10^{-32}$  секунды от взрывного процесса.

### Электрослабая эпоха

К этому моменту сильное ядерное взаимодействие, как и гравитация, отделено от первичной материи. Период с  $10^{-32}$  по  $10^{-12}$  секунд – момент

рождения таких элементарных частиц, как хиггсовский бозон и W-, Z-частицы. Симметрия до вселенского вещества окончательно разрушена.

#### Кварковая эпоха

С  $10^{-12}$  по  $10^{-6}$  секунд все четыре фундаментальные взаимодействия начинают существовать отдельно. Все вещество Универсума представляет собой «кварковый суп» из безмассовых и бесструктурных фундаментальных частиц.

#### Андронная эпоха

Из фундаментальных частиц начали образовываться андроны – частицы с сильным ядерным взаимодействием. Именно из них образуются нуклоны, формирующие атомные ядра, протоны и нейтроны. Весь процесс андронизации занял порядка ста секунд после Большого взрыва.

#### Лептонная эпоха

Первые три минуты существования Универсума происходит формирование лептонов, в том числе и их подвида – нейтрино. Это еще одни фундаментальные структуры вселенского вещества, из которых в дальнейшем было построено все в мироздании.

#### Протонная эпоха

Более 300 тысяч лет ушло на первичный процесс нуклеосинтеза легких химических элементов и перераспределения вещества Универсума. Оно стало доминировать над излучением, что замедлило расширение космического пространства. Конец данной стадии ознаменовался возможностью передвижения тепловых фотонов.

#### Основные теории происхождения Вселенной

Большой взрыв не единственное современное представление о происхождении и эволюции Вселенной. Научный мир знает множество теорий возникновения мира, основными из которых являются:

- Теория струн. Ее основное утверждение заключается в том, что все существующее состоит из мельчайших энергетических нитей. Такие квантовые струны могут растягиваться, искривляться и располагаться в любых направлениях, что делает космическое пространство многомерным. И каждое из этих измерений имеет свою эволюционную стадийность.
- Теория стационарной Вселенной. По этой версии, в расширяющемся пространстве космоса постоянно возникает новая материя, что делает всю систему стабильной. Идея была популярна в середине 20-го века, но после открытия и изучения реликтового излучения у нее практически не осталось сторонников.

Не исключено, что все предположения о возникновении мироздания, признанные сейчас в научном мире, не будут опровергнуты в будущем. И чем

дальше и дольше человечество исследует космические просторы, тем больше новых ответов и вопросов оно находит.

Солнечная система — звёздная система в галактике Млечный Путь, включающая Солнце и естественные космические объекты, обращающиеся вокруг него: планеты, их спутники, карликовые планеты, астероиды, метеороиды, кометы и космическую пыль.

### **Строение Солнечной системы**

В состав солнечной системы входит восемь основных планет и пять карликовых, вращающихся приблизительно в одной плоскости. По своим физическим свойствам планеты делятся на земную группу и планеты-гиганты. Планеты земной группы относительно небольшие и плотные, состоят из металлов и минералов. К ним относятся:

- Меркурий,
- Венера,
- Земля,
- Марс.

Планеты-гиганты во много раз больше других планет, они состоят из газов и льда. Это:

- Юпитер,
- Сатурн,
- Уран
- Нептун.

Орбита Земли делит солнечную систему на две условные области. Во внутренней находятся ближайшие к Солнцу планеты — Меркурий и Венера. Во внешней области — более удалённые от Солнца, чем Земля: Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

Пространство между орбитами Марса и Юпитера, а также за Нептуном (пояс Койпера) занимают малые небесные тела: малые планеты и астероиды. Также по пространству Солнечной системы курсируют кометы и потоки метеороидов.

### Солнце

Звезда класса «жёлтый карлик». 98% массы Солнца приходится на водород и гелий, но в нём также содержатся все известные химические элементы. Солнце ярче, чем 85% звёзд в галактике, а температура его поверхности превышает 5 700°C.

Солнце почти в 110 раз больше Земли, а его масса в тысячу раз превосходит массу всех планет, вместе взятых. Именно благодаря солнечному свету и теплу на Земле существует жизнь.

### Меркурий



Самая близкая к Солнцу и самая маленькая планета солнечной системы — Меркурий лишь немного больше Луны. Меркурий получает в семь раз больше тепла и света, чем Земля, поэтому температура его поверхности колеблется от  $+430^{\circ}\text{C}$  днём до  $-190^{\circ}\text{C}$  ночью. Это самый большой температурный перепад в солнечной системе.

Несмотря на то что люди наблюдали Меркурий на небе с древнейших времён, известно о нём немного. Первый снимок его поверхности был получен только в 1974 году. Она оказалась покрыта многочисленными кратерами и скалами.

Атмосфера практически отсутствует — возможно, причиной тому солнечное излучение, а может быть, небесное тело такого размера просто не в состоянии удерживать плотную газовую оболочку.

Поскольку для оборота вокруг Солнца Меркурию нужно пройти гораздо меньшее расстояние, чем Земле, год на нём значительно короче — всего 88 земных суток. За один меркурианский день успевает пройти более двух местных лет. Поскольку ось вращения планеты почти не наклонена, год на ней не делится на сезоны.

Меркурий назван по имени древнеримского бога торговли и хитрости.

### Венера

Венера - вторая планета от Солнца и ближайшая к Земле. Венеру иногда называют «близнецом» нашей планеты: её размеры и масса очень близки к земным. Однако на этом сходство заканчивается.

Венера окутана очень плотным слоем облаков, за которыми невозможно разглядеть поверхность. Из-за парникового эффекта она нагревается до  $480^{\circ}\text{C}$  — абсолютный рекорд для солнечной системы. Облака проливаются кислотными дождями и пропускают только 40% солнечного света, поэтому на планете царит вечный сумрак.

Из-за сильнейшего атмосферного давления (как на глубине 900 метров в земных океанах) ни один исследовательский аппарат, отправленный на Венеру, не просуществовал дольше двух часов. Тем не менее учёным удалось узнать, что атмосфера планеты на 94% состоит из углекислого газа, а состав грунта не отличается от других планет земной группы. На Венере много вулканов, но почти нет кратеров — все метеориты сгорают в плотной атмосфере.

День на Венере длится дольше, чем на любой другой планете — около 243 земных суток. Продолжительность года чуть уступает дню — 225 земных суток. Как и на Меркурии, сезонов на Венере нет.

Облака Венеры хорошо отражают солнечный свет, поэтому на земном небе планета светится ярче других. Возможно, именно поэтому древние римляне связали её с богиней красоты и любви. Примечательно, что Венера —

одна из двух планет солнечной системы, вращающихся вокруг оси по часовой стрелке.

### Земля

Земля — третья планета от Солнца и крупнейшая в земной группе. Уникальные условия Земли позволили развиваться на планете жизни.

Атмосфера Земли состоит из азота (78%), кислорода (21%), углекислого и других газов (1%). Кислород и азот — необходимые вещества для строительства ДНК. Озоновый слой атмосферы поглощает солнечную радиацию. Кислород на Земле синтезируют растения из углекислого газа. Не будь их, наша планета напоминала бы Венеру. С другой стороны, некоторое количество CO<sub>2</sub> в атмосфере обеспечивает на Земле комфортную для жизни температуру.

70% поверхности Земли покрыты водой. В отличие от Луны и Меркурия, на Земле очень мало кратеров. Учёные считают, что они исчезли под воздействием ветра и эрозии почвы.

Из-за наклона Земной оси (23,45°) на Земле хорошо различимы сезоны года. Для оборота вокруг своей оси Земле требуется чуть менее 24 часов — это самый короткий день среди планет земной группы.

Земля имеет спутник — Луну. Её размер составляет  $\frac{1}{4}$  земного диаметра, что довольно много для спутника. Притяжение Луны влияет на земную воду, вызывая приливы и отливы. Вращение Луны вокруг своей оси и вокруг Земли синхронно, поэтому Луна всегда обращена к Земле только одной стороной.

Земля — единственная планета, название которой не связано с мифологией. И русское «земля», и английское «earth», и латинское «terra» обозначают почву или сушу.

### Марс

Марс — четвертая планета от Солнца — меньше Земли почти в два раза. Долгое время считалось, что на красной планете существует жизнь. Люди наблюдали на его поверхности объекты, казавшиеся им постройками, дорогами и даже гигантскими скульптурами. Однако на поверку марсианская цивилизация оказалась обманом зрения. Многочисленные исследовательские миссии пока тоже не подтвердили наличие какой-либо жизни на поверхности планеты.

Атмосфера Марса по составу напоминает венерианскую — 95% углекислого газа. Но поскольку она очень тонкая и разреженная, парникового эффекта не возникает, поэтому максимальная температура поверхности планеты — около 0°C, а атмосферное давление в 160 раз меньше, чем на Земле. В составе марсианской атмосферы есть водяной пар, а на полюсах лежат шапки ледников, но жидкой воды на поверхности нет.

И всё же учёные считают Марс самой перспективной планетой для освоения, поскольку погодные условия на ней довольно приемлемы для человека. Если не считать низкое содержание кислорода в атмосфере, радиацию и пылевые бури, длящиеся по несколько месяцев. На Марсе находится самая высокая гора в солнечной системе — вулкан Олимп, высота которого 27 километров. Это в три раза выше Эвереста, высочайшей горы Земли.

Из-за удалённости от Солнца год на Марсе почти в два раза длиннее земного. Скорость вращения вокруг своей оси почти такая же, как на Земле, так что сутки длятся 24 часа 40 минут. Наклон оси Марса составляет  $25,2^\circ$ , а значит, на нём, как и на Земле, существуют сезоны.

Марс имеет два спутника — Фобос и Деймос, представляющие собой бесформенные каменные глыбы сравнительно небольших размеров. Из-за красного цвета древние римляне назвали планету именем бога войны.

### Юпитер

Юпитер, самая большая из планет-гигантов, отделена от Марса поясом астероидов. Масса Юпитера в два раза больше, чем масса всех остальных планет, лун, комет и астероидов системы вместе взятых. По яркости на земном небе он уступает только Венере. Люди наблюдали его с древнейших времён и связывали с сильнейшими богами своих пантеонов. Юпитер — имя римского царя богов.

Юпитер является газовым гигантом. Коричневые и белые полосы — это облака соединений серы, которые движутся в атмосфере планеты с чудовищной скоростью. Большое красное пятно Юпитера — гигантский вихрь. С момента его обнаружения в 1664 году он стал заметно меньше, но и теперь в несколько раз превосходит Землю по размерам.

О структуре планеты учёные пока только догадываются. Предположительно она состоит из газов, плавно переходящих в металлическое состояние по мере приближения к ядру. Считается, что ядро Юпитера каменное. Сильнейшее в системе магнитное поле Юпитера воздействует на частицы в миллионах километрах вокруг и даже достигает орбиты Сатурна. Это одна из причин огромного числа спутников у планеты.

В 1610 году астроном Галилео Галилей обнаружил четыре крупнейших спутника Юпитера. В наше время известно 79 объектов, вращающихся вокруг планеты. Некоторые из них напоминают Луну, другие выглядят как большие астероиды. Особый интерес представляет Ио — планета с мощнейшими в системе вулканами. Более мелкие частицы образуют вокруг Юпитера кольца, хотя они не так заметны, как у соседнего Сатурна.

### Сатурн

Шестая планета от Солнца. Как и спутники Юпитера, Сатурн был обнаружен Галилеем в начале XVII века. На сегодняшний день эта планета остаётся одной из наименее изученных.

Атмосфера Сатурна состоит из водорода (96%) и гелия (4%) с незначительными вкраплениями других газов. Скорость ветра на Сатурне достигает 1 800 км/ч — это самые сильные ветра в системе. Облака в его атмосфере тоже образуют полосы и пятна гигантских вихрей, хоть и менее заметные, чем на Юпитере.

О происходящем за атмосферным слоем планеты известно мало. Предположительно, в центре находится металло-силикатное ядро, окружённое спрессованными до состояния металла газами, плотность которых уменьшается по мере удаления от ядра.

Планета находится в 9,5 раз дальше от Солнца, чем Земля, и делает оборот вокруг звезды за 29,5 земных лет. Наклон оси Сатурна напоминает земной. По скорости вращения вокруг своей оси Сатурн уступает только Юпитеру. Как и у других газовых гигантов, скорость вращения на разных широтах у планеты разная. Это происходит потому, что поверхность Сатурна текучая, а не твёрдая. Плотность Сатурна так мала, что он мог бы плавать на поверхности воды.

Главная особенность Сатурна — впечатляющая система из семи колец. Они состоят из миллиардов ледяных осколков, которые отлично отражают свет, а потому хорошо заметны. Радиус колец огромен — 73 000 километров, а толщина — всего 1 километр. Считается, что эти кольца — осколки спутника, разрушенного гравитацией планеты.

Недавние исследования показали, что вокруг Сатурна вращаются 82 спутника — на данный момент это рекорд солнечной системы (до 2016 года лидером считался Юпитер). Все спутники покрыты льдом. Крупнейший, Титан, имеет плотную азотистую атмосферу и озёра жидкого метана на поверхности. На другом спутнике, Энцеладе, обнаружена жидкая вода, выталкиваемая на поверхность гейзерами. Это делает его крайне интересным объектом для изучения.

Сатурн назван именем древнеримского бога времени, отца Юпитера.

### Уран

Седьмая планета от Солнца. Уран был открыт сравнительно недавно — в 1781 году. В 1986 году его достиг единственный космический аппарат — «Вояджер-2».

Атмосфера планеты окрашена в однородный сине-зелёный цвет. Учёные предполагают, что такой её делает метан. Ядра Урана и Нептуна предположительно состоят из льдов, поэтому их называют «ледяными гигантами». Уран — самая холодная планета в системе: средняя температура его поверхности составляет  $-224^{\circ}\text{C}$ . Скорость ветра на Уране достигает 900

км/ч. Солнечный свет летит до Урана чуть менее трёх часов, а год на планете равен 84 земным.

Как и Сатурн, Уран окружён кольцами. Они не столь яркие и расположены под углом около  $90^\circ$  к орбите, в то время как сама планета вращается «на боку» (угол отклонения оси —  $99^\circ$ ). В результате половину уранианского года на южном полушарии длится день, а на южном — ночь. А следующие полгода — наоборот.

Подобно Венере, Уран вращается вокруг своей оси по часовой стрелке. На настоящий момент известно 23 спутника Урана, все покрыты льдом. Уран назван именем древнегреческого бога неба, отца Сатурна, и продолжает «семейную» линию.

### Нептун

Нептун находится так далеко, что его нельзя увидеть с Земли невооружённым глазом. Он был открыт в 1846 году, когда астрономы искали планету, вызывающую орбитальные отклонения Урана.

Достоверные данные о Нептуне получены «Вояджером-2» в 1989 году. Верхние слои его атмосферы состоят из водорода (80%), гелия (19%) и метана (1%). Именно обилием метана объясняется сине-голубое свечение планеты.

Раз в несколько лет в атмосфере планеты появляются и исчезают тёмные пятна штормов. Предположительно в центре Нептуна — ледяное ядро, а мантия состоит из жидкой смеси воды и аммиака. Средняя температура поверхности —  $-214^\circ\text{C}$ .

Солнечный свет достигает Нептуна почти за 5 часов, а нептунианский год равен 165 земным. Полный оборот вокруг своей оси планета делает довольно быстро — сутки длятся всего 17 часов. Наклон оси Нептуна близок к земному —  $28^\circ$ .

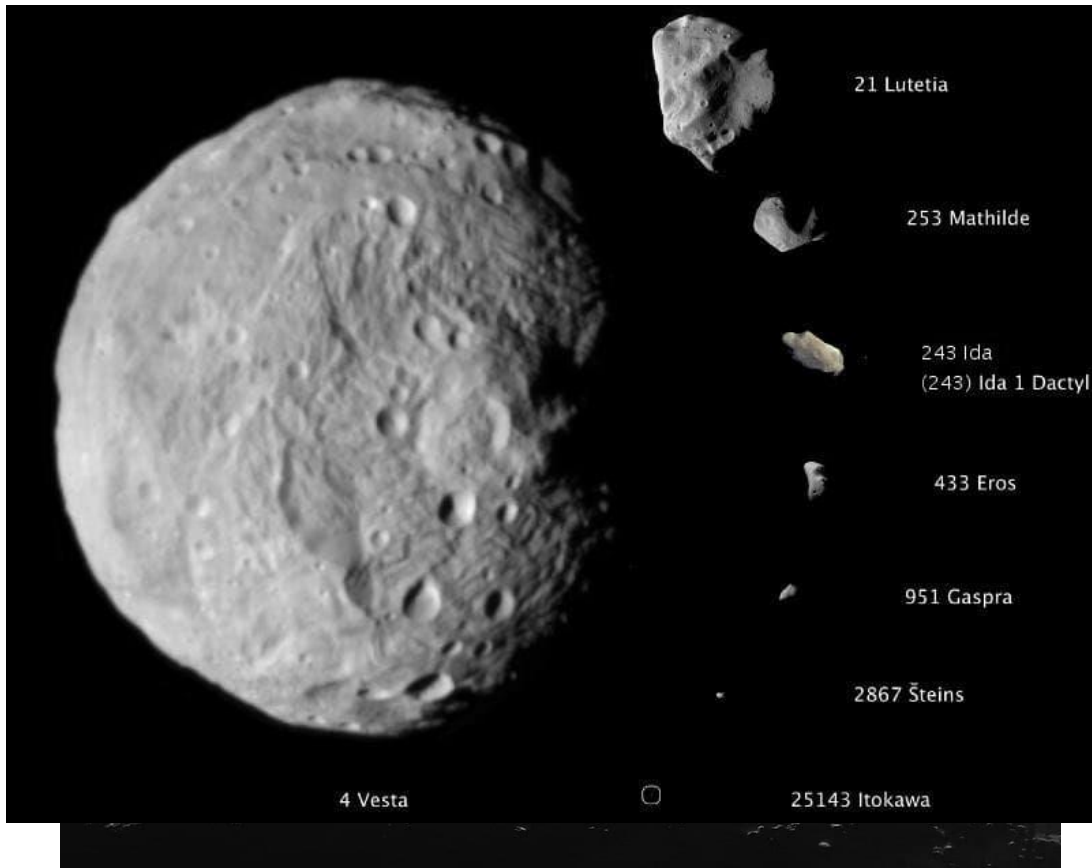
На настоящий момент учёные знают о 14 спутниках Нептуна, лишь один из которых (Тритон) обладает сферической формой. Это единственный в системе крупный спутник с обратным вращением. У Нептуна есть три кольца, хотя выражены они слабо.

За глубокий синий цвет планета была названа именем древнеримского бога морей.

### **Другие объекты Солнечной системы**

Помимо планет и их спутников, в солнечную систему входит множество малых небесных тел — карликовых планет, астероидов, комет и метеороидов.

Большинство **астероидов** сосредоточено в поясе между орбитами Марса и Юпитера. Это объекты неправильной формы, состоящие из металлов и силикатов. Хотя некоторые астероиды даже имеют собственные спутники, их масса слишком мала, чтобы удерживать атмосферу. Крупнейшие — карликовая планета Церера, астероиды Паллада, Веста и Гигея.



За орбитой Нептуна расположен пояс Койпера — средоточие ещё почти неизученных объектов. Самым крупным из них являются карликовая планета Плутон со спутником Хароном.

Под действием гравитации планет орбиты астероидов могут меняться и пересекаться. Иногда это приводит к столкновению. Планеты притягивают **метеорные тела** — обломки небесных тел. Если атмосфера планеты плотная — они сгорают при падении, но самые крупные всё же достигают поверхности, образуя кратеры. Последний известный случай падения метеорита на Землю произошёл в Челябинской области в 2013 году.

**Кометы** — малые небесные тела, движущиеся по вытянутым орбитам. Они состоят из замёрзших газов и космической пыли. По мере приближения к Солнцу частицы вещества нагреваются, образуя горящую голову и хвост кометы. Самая известная комета — Галлея — обращается вокруг Солнца за 76 лет.

Постепенно кометы разрушаются, превращаясь в поток более мелких частиц — **метеороидов**. Из-за небольших размеров они легко притягиваются планетами, но сгорают в плотной атмосфере. Горящие метеоры выглядят с Земли как падающие звёзды. Поэтому метеорный поток в просторечии называют звездопадом.

## Движение объектов солнечной системы

Все объекты солнечной системы вращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Наиболее близкую к Солнцу точку орбиты называют **перигелием**, а самую удалённую — **афелием**.

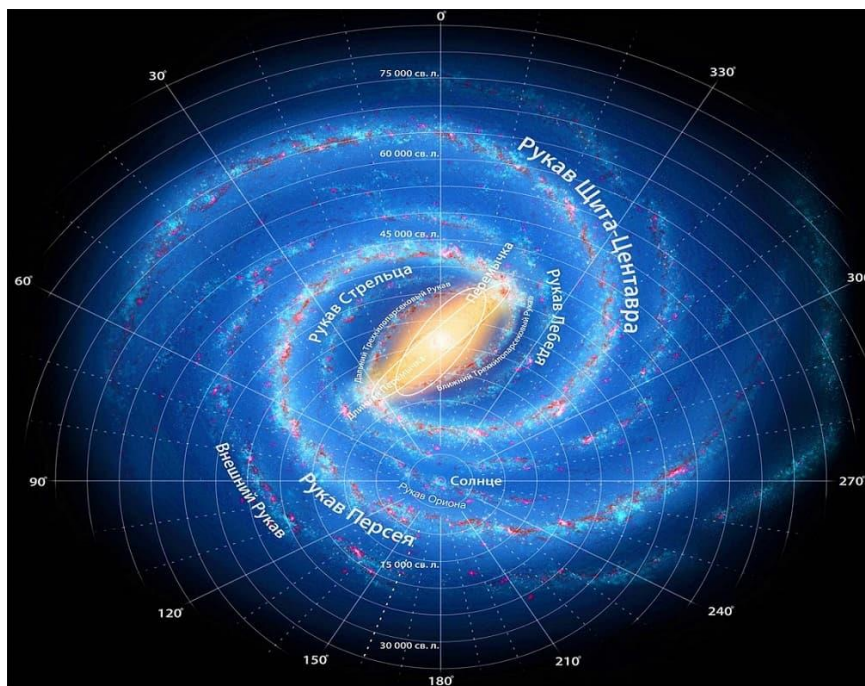
Орбиты планет расположены приблизительно в одной плоскости, поэтому периодически на Земном небе можно наблюдать **Парад планет** — явление, при котором несколько небесных тел будто бы выстраиваются в одну линию на небольшом угловом расстоянии друг от друга.

## Межпланетное пространство

Планеты вращаются не в абсолютной пустоте — пространство между ними заполнено малыми небесными телами, вращающимися по собственным орбитам, блуждающими кометами, потоками метеорных тел и космической пылью.

Кроме того, Солнце излучает мощнейший поток заряженных частиц, называемый **«солнечным ветром»**. Он распространяется по системе с чудовищной скоростью — до 1 200 км/с. Именно солнечный ветер порождает магнитные бури, полярные сияния и радиационные пояса планет.

## Расположение Солнечной системы в Галактике



Солнце — одна из 200 миллиардов звёзд Млечного Пути, оно находится в одном из его спиральных рукавов — рукаве Ориона — на расстоянии 27 000 световых лет от центра Галактики.

Как планеты вращаются вокруг Солнца, так и Солнце вращается вокруг центра Галактики. Солнечная система движется сквозь космическое пространство со скоростью в 250 км/с — это в сотни тысяч раз быстрее самого мощного сверхзвукового самолёта.



Полный оборот вокруг центра Млечного Пути солнечная система совершает за 226 миллионов лет — эта величина называется *галактическим годом*.

### **Изучение Солнечной системы**

Долгое время человечество было убеждено, что все звёзды и планеты вращаются вокруг Земли. Система мира с неподвижной Землёй в центре была разработана греческим учёным Птолемеем во 2 веке до нашей эры и просуществовала более полутора тысяч лет.

В 1453 году польский астроном Николай Коперник доказал, что Земля, как и другие планеты (на тот момент их было известно шесть), вращаются вокруг Солнца. Однако вплоть до XVII века церковь считала это учение ересью и боролась с его последователями.

Одним из них был итальянский монах Джордано Бруно. В 1584 году он опубликовал исследование, в котором утверждал, что Вселенная бесконечна, а Солнце подобно остальным звёздам, просто находится гораздо ближе к Земле. Бруно был схвачен инквизицией и приговорён к сожжению на костре как еретик.

Другим последователем Коперника стал итальянский учёный Галилео Галилей. Он создал первый телескоп, который позволил увидеть кратеры Луны, пятна на Солнце, открыть четыре спутника Юпитера и установить, что планеты вращаются вокруг своей оси. Чтобы не повторить судьбу Бруно, Галилей был вынужден отречься от своих идей.

В XVII веке немецкий астроном Иоганн Кеплер открыл законы движения планет — ему удалось установить связь между скоростью вращения планеты и её расстоянием от Солнца. Его идеи воспринял знаменитый английский физик Исаак Ньютон, создатель теории всемирного тяготения.

В XVIII—XIX веках открытия в области оптики позволили создать более мощные телескопы, которые позволили учёным узнать больше о солнечной системе. Были открыты планеты Уран и Нептун.

В 1951 году Советский Союз вывел на орбиту Земли первый искусственный спутник. С этого момента началась Космическая эра — эпоха практического изучения солнечной системы.

В 1961 году Юрий Гагарин стал первым человеком, побывавшем в космосе, а в 1969 году космический корабль «Аполлон-11» доставил людей на Луну.

В 1970-х годах Советский Союз и США запустили несколько десятков аппаратов для исследования Марса, Венеры и Меркурия, а запущенные в 1980-х аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» позволили получить данные о дальних планетах — Юпитере, Сатурне, Уране, Нептуне и их спутниках. Большую роль в изучении солнечной системы сыграл вывод на орбиту Земли космического телескопа «Хаббл» в 1990 году.

В нынешнем десятилетии космические агентства разных стран планируют пилотируемый полёт на Марс. Экспедиция на другую планету станет величайшим событием в истории освоения солнечной системы. И всё же пока человечество находится в самом начале пути изучения космоса.