

Камчатский государственный технический университет

А. Исаков

**ОСНОВЫ
современного
естествознания**

Часть 3

Естествознание нового времени

**Петропавловск-Камчатский
2012**

УДК 50(075.8)
ББК 20я73
И85

Рецензент
доктор физико-математических наук,
профессор Дальневосточного Федерального университета
Стоценко Л.Г.

Исаков Александр Яковлевич

И85 Основы современного естествознания. Часть 3. **Естествознание нового времени**. Лекции для студентов экономических направлений: Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 336 с.

В книге приведен исторический обзор основных этапов развития естественно-научных представлений об окружающем нас Мире в период, так называемого, классического периода естествознания, а так же показаны особенности взаимодействия человека с Природой.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм образования, изучающих дисциплину «Концепции современного естествознания». Содержание книги составлено на основе многолетнего опыта автора преподавания дисциплины на различных специальностях Камчатского государственного технического университета.

Цель обзора – облегчить адаптацию студентов экономического и гуманитарного направлений образования в среде естественнонаучных дисциплин и помочь в выполнении индивидуальных заданий и контрольных работ.

Обзор построен в форме хронологического рассмотрения отдельных этапов развития естественнонаучных знаний и этюдов о выдающихся учёных, заложивших основу современного комплекса знаний и технологий в области математики, физики, астрономии, химии, биологии, географии, техники и т.д.

Оглавление

1. Электрические явления и эффекты	
1.1. Исторический экскурс	4
1.2. Свойства электрических полей	34
1.3. Напряженность электрического поля	45
1.4. Энергетические характеристики электрических полей	47
1.5. Накопители электрической энергии	51
1.6. Применение конденсаторов	54
1.7. Направленное движение электрических зарядов	56
1.8. Основные законы постоянного тока	59
1.9. Эффективность источников тока	68
1.10. Химические источники тока	70
2. Магнитные явления	
2.1. Магнитное поле движущихся зарядов	75
2.2. Электромагнитная индукция	83
2.3. Электродинамика Максвелла – Герца – Хевисайда	87
2.4. Электромагнитные волны	98
2.5. Излучение и приём электромагнитных волн	107
3. Атомное строение материи	
3.1. Теоретические предпосылки	113
3.2. Открытие радиоактивности	139
3.3. Классическая электронная теория	145
3.4. Элементы квантовой механики	147
3.5. Квантовая модель атома	154
4. Элементы физики атомного ядра	
4.1. Структура и свойства атомных ядер	159
4.2. Естественные и искусственные ядерные превращения	164
5. Энергия атома	
5.1. Научная и экономическая целесообразность	182
5.2. Атомные энергетические установки	200
5.3. Атомный ледокольный флот	206
5.4. Военный атомный флот	211
6. Атомное оружие	
6.1. Начало	224
6.2. Манхэттенский проект	236
6.3. Создание атомного оружия в СССР	247
6.4. Термоядерное оружие	257
7. Природа и цивилизация	
7.1. Солнце	267
7.2. Земля	278
7.3. Водные заботы человечества	310
7.4. Феномен жизни	313
7.5. О происхождении человека	319
7.6. Дорога в никуда	324
7.7. Перспективы «разума»	329
Заключение	330

1. Электрические явления и эффекты

1.1. Исторический экскурс

По описаниям древних натурфилософов, первым кто обратил внимание на электростатические эффекты был Фалес Милетский (640/624 — 548/545 до с. л.), который, желая приучить свою дочь к труду, рекомендовал ей заниматься изготовлением пряжи, что она делала посредством янтарного веретена.

В один из дней дочь пожаловалась Фалесу, что к веретену, сделанному из электрона (так древние греки называли янтарь), прилипают шерстяные ворсинки и прочий лёгкий мусор, а прилипшие предметы трудно от веретена отделить.

Фалес понаблюдая за этим странным явлением, провёл несколько манипуляций с янтарной палочкой и пришёл к выводу, что янтарь, будучи натёртый лоскутком сухой кожи, **приобретает свойство действовать на расстоянии на предметы**, т.е. материал приобретает свойства воздействия на расстоянии. Об этом наблюдении

В те же славные времена обнаружилось ещё одно удивительное явление, связанное с поведением некоторых камней, обнаруживаемых на поверхности земли. В частности, на территории современной Турции в V веке до с.л. стоял город Магнезия, в окрестностях которого с незапамятных времён находили камни, которые, будучи подвешенными на шёлковой нити, имели свойство сохранять ориентацию в пространстве на поверхности Земли.

Их называли «**путеводные камни**». Как правило, они имели плоскую форму и ориентировались по направлению север – юг.

Древнеримский император – полководец Кай Юлий Цезарь во время похода своих легионов в горах наблюдал на остриях копий своих воинов «**холодный огонь**». Подобные пляшущие свечения на мачтах своих кораблей видели Магеллан и Колумб во время морских путешествий. Таким же таинственным светом временами светился шпиль церкви святого Эльма во Франции.

Все эти явления в миру воспринимались достаточно спокойно, в меру религиозного догматизма времени и места, а вот гром и молния, с древнейших времён и по сегодняшний день вселяют во все живые существа ужас и смятение.

Древние Греки своего главного Бога – Зевса считали повелителем молнии и грома. У Римлян аналогичные обязанности исполнял Юпитер, братья славяне в этом смысле почитали Перуна.

Благоговение человечества во все времена перед этими стихиями неудивительно, дело в том, что обычная молния, так сказать, средней руки, за время разряда $\tau \cong 0,1\text{с}$ выделяет в окружающее пространство энергию порядка $10^9 - 10^{10}$ Дж, что превосходит энергию атомной бомбы. Сила тока достигает 10^5 А, температура в канале рана $2 \cdot 10^4$ К.

В определённом смысле, упомянутые выше, и многие другие явления электрического и магнитного характера обязаны особенностям строения нашего Мира в материальном и полевом проявлениях. Начиная разговор об электричестве и маг-

нетизме, необходимо хотя бы в двух словах коснуться вопроса о строении материи. Дело в том, что все электромагнитные явления обусловлены взаимодействиями на атомных и ядерных уровнях.

К настоящему времени установлено всего четыре типа фундаментальных взаимодействий:

- **гравитационное;**
- **электромагнитное;**
- **слабое ядерное;**
- **сильное ядерное.**

Образно говоря, весь наш подлунный мир, да и не только, является следствием этих четырёх взаимодействий, а может и ещё каких, не открытых до настоящего времени.

Кстати, древние греки тоже основу мироздания связывали с четырьмя стихиями: землёй, воздухом, огнём и водой. По мнению российского учёного – теоретика Маркова М.А. (1908 – 1994 гг.) вполне уместно провести аналогию между древними и современными представлениями, из которых становится очевидным сомнительное интеллектуальное преимущество людей нашего времени над теми, кто жил на территории нашей Родины и в древней Греции, Древнем Китае да и не только в них.

Далее будут рассмотрены некоторые электрические и магнитные явления, которые объединены в одно понятие совершенно не случайно.

Природа устроена, так, что для одного наблюдателя явление кажется электрическим, для другого – магнитным, и наоборот.

Электромагнитное взаимодействие лежит в основе большого числа повседневных явлений, включая жизнедеятельность живых организмов.

Одним словом, всё, от щелчка тумблера на панели телевизора, до, пока ещё во многом не понятного биологического поля, подчиняется законам электричества и магнетизма. И хотя открыты сейчас самые простые из них, результаты использования электромагнитных законов столь впечатляющи, что они стали основой всей цивилизации.

Действительно, если рассматривать отдельные разделы естествознания в плане их практического использования, то электромагнетизму конкуренции нет, несмотря на то, что серьёзно эту отрасль человеческих знаний начали развивать относительно недавно.

История научного становления теории электрических и магнитных явлений полна захватывающих тайн и непонятных злоключений. Иногда у профессиональных историков науки создаётся впечатление, что есть некие высшие силы, которые время от времени препятствуют дальнейшему развитию электромагнетизма, направляя лучшие умы естествоиспытателей на другие задачи, не сулящие в обозримом будущем райские кущи и даже виды Палестины в волшебном фонаре.

Несмотря на то, что до конца еще не ясна сама суть электрических и магнитных явлений, многие вопросы широко и эффективно разработаны на инженерном и технологическом уровнях.

К настоящему времени человек открыл много всяких законов, которые объясняют отдельные свойства Мира. Однако, среди этого множества есть два: **закон гравитации Ньютона и закон электростатического взаимодействия Кулона**, которые «управляют» материей и полем в невообразимо разных масштабных уровнях. На рис. 1.1 приведен приблизительный масштаб Вселенной, о которой человек имеет некие представления.



Рис. 1.1. Расстояния во Вселенной

Как видно из приведенных данных, постижимые размеры объектов простираются примерно от 10^{-17} м (размера ядра) и до 10^{+27} м (приблизительное расстояние до самого отдаленного наблюдаемого астрономами объекта во Вселенной).

Другими словами, минимальный размер от максимального различается примерно на 44 порядка, а законы, превалирующие на границах этого не поддающегося образному восприятию диапазона, имеют мистически одинаковую структуру и свойства.

Как известно закон гравитации в векторной форме определяется известным уравнением Ньютона

$$\vec{F}_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^3} \vec{r},$$

и наиболее сильно проявляется в масштабах мегамира, с его огромными массами и расстояниями. В микромире, на уровне молекул, атомов и ниже закон гравитации проявляется весьма слабо, там «царит» закон электростатического взаимодействия зарядов – закон Кулона

$$\vec{F}_k = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^3} \vec{r}.$$

Оба закона имеют одинаковую структуру: **величина взаимодействия, определяемая силой, пропорциональной произведению основных характеристик взаимодействующих тел (масс или зарядов), и обратно пропорциональной квадрату расстояния между взаимодействующими объектами.**

Созерцая эти два уравнения у многих учёных, не склонных к особой романтике в обыденной жизни, появлялась уверенность в неотвратимом открытии в ближайшее время универсального закона взаимодействия мирового масштаба. Но тайны природы временами позволяют себе лёгкий флирт с исследователями, но чаще представляют собой весьма труднодоступные «вершины».

Вот, к примеру, А. Эйнштейн последние десять с лишним лет своей жизни потратил на поиск взаимосвязи между электромагнитным и гравитационным полем, практически безрезультатно. Единой теории поля так и не получилось.

В уравнениях Ньютона и Кулона расстояние r , не случайно поставлено возведённым в куб. Некоторые естествоиспытатели считают, что именно этот показатель степени определяет количество измерений нашего мира. Рассуждения их просты и лаконичны. Модули обеих сил обратно пропорциональны квадрату расстояния, это можно записать так

$$|\vec{F}| \approx \frac{1}{r^{(n-1)}}.$$

Обсуждаемые фундаментальные законы выполняются только при $n = 3$. При всех других значениях n закон гравитации и электрического взаимодействия не выполняются. Отсюда есть основания считать, что именно эта магическая «тройка» определяет трёхмерность нашего Мира.

На некоторые странности развития учения об электричестве обратили внимание не только учёные, но даже поэты. Французский поэт Поль Валери (1871 – 1945 гг.), не мог понять, почему такая практически значимая и научно необходимая область естествознания так долго оставалась без систематического внимания серьёзных учёных: «Что может быть более непонятно для ума, чем история этого небольшого кусочка янтаря, столь покорно проявляющего силу, которая скрыта во всей природе, которая, быть может, есть вся природа и которая в течение всех веков, кроме последнего, проявлялась лишь в нём?» На то они и поэты, чтобы говорить красиво.

Станным кажется и то, что электромагнитное взаимодействие обнаружилось, по сути, только в XIX веке, хотя электромагнитные силы распространены в природе не меньше, чем гравитационные.

Но история такова, какова она есть. Можно только догадываться по косвенным проявлениям, почему наука об электрических и магнитных явлениях прошла именно такой путь, а не повторила относительно ранее и достаточно революционное развитие классической механики.

В короткой истории электромагнитной науки можно выделить три характерных периода. Самый затяжной из них, часто называют «медицинским», потому что открытые к XVII веку способы электризации тел использовались в основном шарлатанствующими врачевателями и прочими авантюристами.

Продвинутые придворные эскулапы дурачили не шибко сведущих коронованных особ и их окружение сказками о возможности оживлять умерших посредством электрических разрядов.

Получив материальную поддержку, алхимики от электричества закупали оборудование и материалы, принимали повышенные обязательства в деле раскрытия тайн природы и пускались в новые странствия.

По Европе колесили команды «волшебников», которые в своём балагане изумлённой и находящейся в полубморочном состоянии, публике демонстрировали, как под воздействием неких хитроумных машин у отошедших уже в другой мир людей открывались глаза, вставали дыбом волосы.

А иногда трупы дёргали конечностями и даже садились и открывали глаза. Если представить себе, что всё это действие происходило в полутёмном помещении, где специально пускали цветные дымы и сжигали серу, то изменение положения отдельных частей тела совсем не живых людей, производило неизгладимое, граничащее с ужасом, впечатление на присутствующих.

Джентльмены исступлённо тарасили глаза, забыв о правилах поведения в общественных местах, а леди, пронзительно хором взвизгнув, отправлялись в обморочное состояние.

Параллельно с «освоением» электрических эффектов предпринимались попытки использовать и магнитные явления, причём тайн и мистицизма в этих попытках было куда как больше.

Магнетизм, так же как и электричество прошёл «медицинский» период. Магнитные материалы принимали вовнутрь, привязывали к опухолям и даже клали под подушку неверным жёнам, чтобы притянуть их к супружескому ложу. Опять же, за милую душу, магнитами снимали порчу и сглаз.

Отрадно, что среди врачей были весьма образованные люди, которые обратили внимание на электричество и магнетизм не на как средство добывания денег и авторитета, а как на объективный элемент природы.

Первое систематическое описание свойств магнитных и «электрических» материалов было сделано придворным врачом Елизаветы Тюдор I, Джильбертом (Гильбертом). Именно Гильберт (1544 – 1603 гг.) попытался впервые осмыслить наблю-



Рис. 1.2. Уильям Гильберт

даемые явления с научных позиций и вернулся к античной идее эфира, окружающего электрически заряженные тела и магнитные материалы.

Следующий этап, был универсальным для всех отраслей знаний. Как только механика достигла успехов в теории и практике, как только она сложилась в самостоятельную науку, основные идеи механики стали копировать, перенося механические взгляды, методы и средства на другие естественные науки.

И были поразительные успехи. Закон гравитации Ньютона, будучи скопированным, по форме, привёл Кулона к открытию своего знаменитого закона, который, помимо прочего привёл к более конкретному определению напряжённости поля.

Для поверхности Земли закон гравитации имеет вид: $\vec{F}_{g(0)} = m\vec{g}$, а закон Кулона через напряжённость поля – $\vec{F}_k = q\vec{E}$. Комментарии, как говорится – излишни.

Популярный афоризм нашего бывшего премьера: «Хотели, как лучше, а получилось, как всегда», можно применить и к истории развития теории электричества.

Астроном Жан Пикар, перенося в ночное время ртутный барометр, обратил внимание, что пустая часть трубки светится слабым голубым светом.

Своё наблюдение в 1676 г. Пикар опубликовал, сообщение попало в руки Иоганна Бернулли, который изготовил специальный прибор для наблюдения этого явления.

Откачанная закрытая стеклянная трубка была частично заполнена ртутью, при её встряхивании в темноте поверхность стекла светилась таинственным голубым светом, который назвали «фосфорическим светом», хотя фосфор к этому отношения не имел, однако это выяснилось только во второй половине XIX века



Рис. 1.3. Стивен Грей

Изучение «фосфорического свечения» стало проводиться многими любознательными людьми. В 1705 г. английский естествоиспытатель Хоксби обнаружил, что свечение возникает при натирании стеклянной палочки тканью.

Это явление мог наблюдать и рассуждать о нём каждый. Стивен Грей (рис. 1.3), отошедший по возрасту от дел, начав экспериментировать с электрическими явлениями, установил, что от наэлектризованной палочки могут заряжать некоторые тела, а некоторые – нет. Таким образом, на фоне интеллектуальных своеобразных забав, в науку вошли понятия проводника и изолятора (диэлектрика). Грей первым, по крайней мере в Англии, начал демонстрировать передачу электростатического заряда через человеческие тела.

Он посредством всё той же стеклянной палочки, подносимой к её левой руке, сообщал заряд даме, раскачивающейся на качелях, подвешенных на шёлковых нитях. Ассистент дотрагивался до правой руки дамы, и присутствующие могли наблюдать проскальзывание искр.

Эффектные электрические зрелища заинтересовали французского учёного с энциклопедическим складом ума Франсу Дюфэ (1698 – 1739 гг.), который, проведя их бесчисленное множество, пришёл к фундаментальному заключению о наличии

в природе зарядов двух типов «стеклянных» и «смоляных». Кроме того, Дюфэ начал использовать в своих опытах по электризации тел в качестве источника зарядов стеклянный шар (рис. 1.4), который по началу контактировал с руками экспериментатора. Заряд с шара посредством цепи передавался на сложную конструкцию с разнообразными живыми организмами и растениями.

Модернизация установки Хоксби не заставила себя долго ждать. Стеклянный шар, достаточно сложный в изготовлении вскоре был заменён стеклянной трубкой, вращаемой педальным приводом.

Усовершенствование конструкции осуществил профессор латинской литературы Иоганн Винклер (1703 – 1770 гг.). Электрическими явлениями интересовались практически все образованные люди, становясь, время от времени на естественнонаучную стезю. Трубку стали натирать не руками, а кожаными подушечками, отороченными конским волосом. Конструкция была настолько совершенной, по тем временам, что получаемые с её помощью искры могли зажигать смоченную эфиром вату.

После таких экспериментов невольно на ум приходила аналогия генерируемой в условиях «лабораторий» искры с грозным природным явлением – молнией (рис. 1.8). Уместно вспомнить в этой связи, что задолго до описываемого времени, древние римляне пытались классифицировать молнии «по назначению», на национальные, семейные и индивидуальные, предупреждающие, подтверждающие могущество, увещательные и наказующие.

Аристотель в своей работе «Метрология», подчёркивал, что молнии «любят» металлы: «Случалось, что медь щита расплавлялась, а покрывающее его дерево оставалось невредимым».

Небезызвестный наставник Нерона – философ Сенека (4 –60 гг. с.л.) тоже на предмет «пристрастия» молний писал: «Серебро расплавляется, а кошелек, в котором оно заключалось, остаётся невредимым».

Аналогичное свойство отмечал ранее Плиний, римский писатель, философ, военный и государственный деятель ещё в III в. до с.л.: «Золото, медь, серебро, заключенные в мешке, могут быть расплавлены молнией, а мешок не сгорит и даже восковая печать не размягчится».

Вот уже более двух тысяч лет человечество целенаправленно интересуется молнией, но вреда она по-прежнему приносит много. Только в Соединённых Штатах молния ежегодно становится причиной около 7500 лесных пожаров.

В 1848 г. французский астроном, физик и математик Доминик Франсуа Араго (1786 – 1853 гг.) выпустил книгу с характерным названием «Гром и молния», где



Рис. 1.4. Влияние электричества на организмы и растения



Рис. 1.5. Молния и электрический разряд

описал многочисленные случаи проявления атмосферного электричества. Араго попытался классифицировать молнии и громы с позиций их проявления по отношению к человеку, животным и различным предметам, находящимся в воздухе и на поверхности Земли.

В книге Араго было собрано много исторических рецептов предостережения от поражения атмосферным электричеством. Сообщалось, в частности, что японские императоры во время грозы прятались в специальном укрытии, над которым размещался большой сосуд с водой.

Император Август во время грозы облачался в одежды, сшитые из тюленьих шкур, а пастухи приволжских степей использовали в качестве защиты войлочные покрывала. Упоминалось так же, что моряки в XV в. в качестве защитного средства использовали металлические мечи, укрепленные на верхушке мачт парусных судов.

Увлечение электрическими опытами в Америку прибыло морским путём вместе с пронырливыми «популяризаторами» последних достижений чародейства и волшебства.

В 1747 г. один из таких научных коммивояжёров, некто доктор Спенсер развернул в Бостоне свой электрический балаган. Колонисты валили валом, «наука» приносила доход.

Среди любопытствующих ковбоев, торговцев лошадьми и сбруей одно из представлений посетил почтенного вида джентльмен, портрет которого в последствии был размножен миллиардными тиражами.

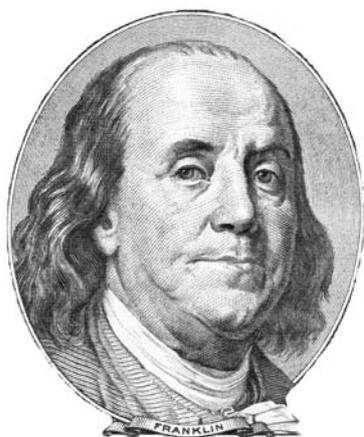


Рис. 1.6. Бенжамен Франклин

Да, это был Бенджамен Франклин, портрет которого украшает американские деньги (рис. 1.6) самого большого достоинства.

Он прославился в политике как сторонник объединения штатов, а в науке об электричестве, которой он занимался в преклонном возрасте всего семь лет, он ввёл в обиход такие всем знакомые сейчас понятия, как: «конденсатор», «батарея», «обмотка», «проводник», «заряд».

Посмотрев фокусы доктора Спенсера и прослушав ряд популярных лекций Франклин увлёкся, и, будучи человеком талантливым, на основании собственных опытов и наблюдений других людей, он **разработал одну из первых достаточно убедительных теорий электричества.**

Именно с подачи Франклина по учебникам и академическим статьям пошло гулять понятие «электрической жидкости», содержанием которой Франклин объяснял наличие заряда разного знака в телах.

Именно с подачи Франклина по учебникам и академическим статьям пошло гулять понятие «электрической жидкости», содержанием которой Франклин объяснял наличие заряда разного знака в телах.

Избыток электрической жидкости обуславливал положительный заряд, недостаток жидкости – отрицательный заряд. Несмотря на отсутствие на самом деле в заряженных телах «электрической жидкости» теория, построенная на её основе, принесла определённый прогресс.

Произошло то же, что с мифическим флогистоном Сади Карно, который на основании принципиально неверной концепции получил гениальные выводы касательно коэффициента полезного действия тепловых двигателей.

В принципе, Франклин был недалёк от истины, если учесть что носителем заряда является не особая жидкая субстанция а отрицательно заряженные электроны, более подходящие по своим свойствам на вещество в газообразном состоянии.

Франклин тоже усматривал аналогию между молнией и электрической искрой, но тут он был не первым.

Ньютон в 1716 г. в своей обширной переписке замечал: «Тот, кто копается в глубоких шахтах знания, должен, как и всякий землекоп, время от времени подниматься на поверхность подышать чистым воздухом. В один из таких промежутков я и пишу вам. Я много занимался замечательными явлениями, происходящими, когда приводишь в соприкосновение иголку с кусочком янтаря или смолы, потёртой о шёлковую ткань. Искра напомнила мне молнию малых размеров».

И если Ньютону искра только напоминала настоящую молнию, то Франклин с уверенностью замечал, что «**вещество молнии**» и «**вещество электричеств**» тождественны.

Тождественность электричества с молнией, по мнению Франклина, заключалась в следующем: даёт свет; тот же цвет света; ломаное направление; быстрота движения; проводится металлами; создаёт треск или шум при взрыве; разрушает предметы, через которые проходит; убивает животных; плавит металлы; зажигает легковоспламеняющиеся вещества.

Как только Франклину открылась электрическая суть молнии, он сделал самое своё главное изобретение – **громоотвод**. Первенство в изобретении громоотвода оспаривается чешскими историками науки. Они утверждают, что за шесть лет до Франклина, т.е. в 1745 г. священник Прокопий Дивиш из Прендиц установил на своём доме вертикально десятиметровый железный шест, зарытый одним из своих концов глубоко в землю, а второй конец шеста был устремлён в небо.

Громоотвод Прокопия Дивиша просуществовал недолго. Кто-то из коллег изобретателя объяснил местным крестьянам, что причины засухи и неурожая заключаются в дьявольском шесте над домом священника. Идея была загублена на корню.

Вообще по поводу громоотвода бушевали нешуточные страсти и в масштабах Европы. В Париже, например, даже женские шляпки умудрялись изготавливать с громоотводами. В тоже время, в 1780 г. на буржуа Визери, установившим на своём доме защиту против атмосферного электричества, соседи подали в суд и судились с ним четыре года. Только благодаря уникальным способностям молодого адвоката Максимилиана Робеспьера (того самого) Визери был оправдан.

Следующим поворотным пунктом в истории электрических исследований было открытие в 1745 г. немецкого каноника Эвальда Юргена фон Клейста, который в свободное от основной богоугодной работы время занимался приготовлением полезной для здоровья электризованной воды, которая затем легковёрным прихожанам продавалась за «святую».

В стеклянную банку (рис. 1.8) вставлялся стержень, по некоторым косвенным признакам из серебра, воде через стержень сообщался электрический заряд.

Бутылочки с такой водой продавали прихожанам, которым она якобы помогала от недугов. Процесс производства фон Клейст сопровождал предположительно возданием должного церковному вину. Забыв налить в бутылку воды, Клейст принялся вращать стеклянный шар, сообщая заряд пустой бутылки.



Рис. 1.7. Франклин за работой

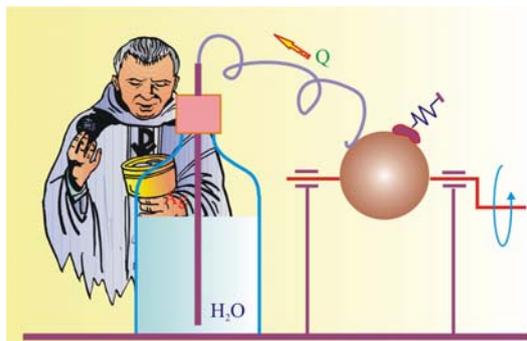


Рис. 1.8. Схема производства «святой» воды

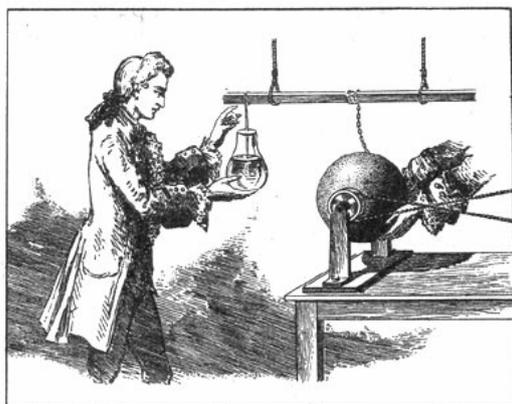


Рис. 1.9. Первые опыты с лейденской банкой

этой цели повесил на двух шарах из голубого шёлка железный ствол, получавший, через сообщение, электричество от стеклянного шара, который приводился в быстрое вращение и натирался прикосновением рук. На другом конце висела медная проволока, конец которой был погружен в круглый стеклянный сосуд, отчасти наполненный водой, который я держал в правой руке, другой же рукой я пытался извлечь искры из наэлектризованного ствола. Вдруг моя правая рука была поражена с такой силой, что всё тело содрогнулось, как от удара молнией. Сосуд, хотя и из тонкого стекла, обыкновенно сотрясением этим не разбивается, но рука и всё тело поражаются столь страшным образом, что и сказать не могу, одним словом, я думал, что при шёлконец ...».



Рис. 1.10. Группа лейденских банок

При таких, сопряжённых с опасностями для жизни, обстоятельствах был открыт простейший конденсатор – лейденская банка. Уже в следующем году сосуды экзотических форм с водой были заменены простой цилиндрической банкой с обкладками из металлической фольги с обеих сторон – внутри и снаружи.

Был так же создан плоский конденсатор, для увеличения эффекта Винклер в Германии, а Франклин в Америке соединили банки, параллельно получив, таким образом, достаточно ёмкие «батареи» (рис. 110). Это нехитрое устройство долгое время служило верой и правдой во многих естественнонаучных лабораториях и демонстрационных балаганах.

Дотронувшись в конце цикла до металлического стержня рукой, Клейст испытал удар, чему не мало был удивлён. Этот «страшный опыт» вскорости повторил в Лейдене некто Кюнеус, ученик профессора Питера Ван Мушенбрека.

Используя электрическую машину в виде гуттаперчевого шара фон Герике (рис. 1.9) тоже пытался зарядить воду, которая посредством стальной цепочки соединялась с машиной.

По окончании цикла зарядки Кюнеус решил рукой вынуть из воды цепочку и получил электрический удар такой силы, что чуть не скончался на месте. Выслушав леденящий душу, рассказ своего студента, профессор Мушенбрек (1692 – 1761 гг.) решил проверить открытия Кюнеуса.

Проведя серию экспериментов, он описал их следующим образом: «Хочу сообщить вам новый и страшный опыт, который никак не советую повторять. Я сделал некоторые исследования над электрической силой и для

Святые отцы постигали тайны естествознания со свойственным им размахом и обстоятельностью. Не менее 700 французских монахов, собранных по этому случаю из окрестных монастырей и приходов, взявшись за руки, провели лейденский эксперимент. В тот момент, когда первый монах прикоснулся к электроду лейденской банки, все остальные одновременно и дружно взревели, потрясённые электрическим ударом.

Версаль не мог остаться в стороне от прогресса. Следом за монахами в цепь стали королевские мушкетёры. Даже гвардейская выдержка и навыки в фехтовании не смогли противостоять электрической силе стеклянной банки, обёрнутой внутри и снаружи металлической фольгой: «Было очень курьёзно видеть разнообразие жестов и слышать мгновенный вскрик, исторгаемый неожиданностью у большей части получающих удар». Тешил королевскую чету придворный «электрик», аббат Нолле.

Забавы забавами, но все эти фокусы требовали объяснений. Теории электричества стали появляться как грибы после теплого летнего дождя. Ряд исследователей вспомнил Рене Декарта с его особыми флюидами, пронизывающими буквально всё в этом подлунном мире.

В совокупности с попытками воссоединить всепроникающий флюид и механические представления о процессах (других успешных теорий практически на тот момент не существовало) появились весьма запутанные и невнятные трактовки результатов экспериментов и демонстраций.

Самой успешной, как отмечалось выше, была концепция флюида Бенджамена Франклина, который приписал флюиду три основных свойства: чрезвычайную тонкость, взаимное отталкивание его частей и сильное притяжение электрического флюида к обычной материи.

По мнению Франклина, всякое тело, заряженное электрическим флюидом, создавало в своих окрестностях «электрическую атмосферу». Термин оказался настолько удачным, что его употребляли буквально до середины XIX в., часто не в переносном, а в буквальном смысле.

Следует отметить, что идея мифического флюида в истории науки не нова. Достаточно вспомнить, как в термодинамике возникли понятия температуры и теплоты.

В теории тепла использовался, по сути, тепловой флюид в виде особой невидимой жидкости, который называли флогистон или теплород. И что удивительно. Несмотря на то, что понятие флогистона маскировало собой сложнейшие процессы на атомном и молекулярном уровне и было в корне неверным, оно внесло некоторую ясность в теорию тепловых явлений и даже позволило получить количественные соотношения. Условие теплового баланса, например, о Сади Карно уже было сказано выше.

На формирование научно обоснованных представлений об электрических явлениях во все времена оказывали влияние проявления электрических свойств у водных обитателей.

При изучении содержания древних египетских писем, сделанных на базальтовых плитах, было обнаружено изображение священной рыбы – нильского сома (рис. 1.11), который «на-



Рис. 1.11. Нильский электрический сом



Рис. 1.12. Электрический скат

граждал» мощным электрическим ударом всякого, касавшегося его.

Аристотель, прогуливаясь с учениками под оливковыми деревьями сада, окружающего ликей, повествовал об удивительных, на его взгляд, свойствах средиземноморского ската (рис. 1.12), который «заставляет цепенеть животных, которых он хочет поймать, побеждая их силой удара, живущего в его теле». В древней Греции использовали свойства электрических угрей исторгать из себя электрический заряд для лечения подагры стареющих патрициев.

Средние века ничем особенным в плане исследования электромагнитных явлений не ознаменовались. Продолжались электромагнитные фокусы и сочинительство легенд. Правда, алхимики средневековья в своих попытках облагораживания металлов и поисках философского камня широко пользовались природными магнитами. Вначале в Китае, а потом и в Европе стали получать распространение магнитные компасы.

Заметные успехи в электродинамике, так же как и в других областях человеческих знаний стали появляться в Эпоху Возрождения, теоретическое осмысление наблюдаемых явлений возникли только после изобретения источников электрического тока относительно продолжительного действия. Все, что было связано с лейденскими банками и молниями, исследовать количественно было затруднительно ввиду скоротечности процессов.

Во многих странах установлены памятники собакам, которые вполне заслужили таких почестей своим беззаветным служением человечеству. Памятник, хотя бы один, надо непременно поставить **бесхвостым амфибиям**, именуемым в просторечии лягушками. Потому что история лягушек и история науки об электричестве на определённом временном интервале тесно переплелись.



Рис. 1.13. *Rana sylvatica*

Лягушка (рис. 1.13), можно сказать, по воле случая была востребована передовой наукой и стала на короткий, но чрезвычайно плодотворный промежуток времени центром внимания многих учёных мужей.

Вставляя химический источник тока (батарейку) в любое бытовое светящее или играющее устройство уместно иногда вспомнить добрым словом этих совершенно безобидных существ. Но, обо всём по порядку.

Вот выдержка из старой энциклопедии конца XVIII века: «В течение це-

лых тысячелетий холоднокровное племя лягушек беззаботно совершало свой жизненный путь, как наметила его природа, зная одного только врага, господина аиста, да ещё, пожалуй, терпя урон от гурманов, которые требовали для себя жертвы в виде пары лягушачьих лапок со всего несметного рода. Но в исходе столетия наступил злосчастный век для лягушек. Злой рок воцарился над ними, и вряд ли ко-

гда-либо лягушки от него освободятся. Затравлены, схвачены, замучены, скальпированы, убиты, обезглавлены, – но и со смертью не пришёл конец их бедствиям. Лягушка стала физическим прибором, отдала себя в распоряжение науке. Срезают ей голову, сдерут с неё кожу, расправят мускулы и проткнут проволокой спину, а она всё же не смеет уйти к месту вечного успокоения; повинуюсь приказанию физиков и физиологов, нервы её придут в раздражение и мускулы будут сокращаться, пока не высохнет последняя капля «живой воды». И всё это лежит на совести у Алои-зо Луиджи Гальвани (1737 – 1798 гг.)».



Рис. 1.14. Луиджи Гальвани

Существует две версии возникновения интереса Луиджи Гальвани (рис. 1.14) к лягушкам. По одной из них, в конце 1780 г. профессор анатомии занимался по обыкновению препарированием одной из представительниц лягушачьего племени исключительно с целью удовлетворения собственного любопытства о её внутреннем устройстве. По другой версии Гальвани потрошил лягушек для того, чтобы сварить больной жене целебный лягушачий бульон. Обе версии заканчиваются одинаково. В комнату, где профессор занимался со своим ассистентом – физиком расчленением очередной бесхвостой амфибии, вошла жена, и тут же поспешила упасть в обморок. Когда анатом и физик привели её в чувства, она с явно выраженным на лице ужасом показала на отрезанную лапку лягушки, которая лежала на столе электрической машины и дёргалась, во время касания лежавшего рядом металлического скальпеля – как живая.

Тут было чему удивиться и двум мужественным учёным, которые, оставив свои прежние намерения, на целых 11 лет сосредоточились на всестороннем исследовании этого феномена. Гальвани об этом написал так: «Когда один из моих помощников острием скальпеля случайно очень легко коснулся внутренних бедренных нервов этой лягушки, то немедленно все мышцы конечностей начали так сокращаться, что казались впавшими в сильнейшие тонические судороги. Другой же из них, который помогал нам в опытах по электричеству, заметил, как ему казалось, что это удастся тогда, когда из кондуктора машины извлекается искра. Удивленный новым явлением, он тотчас же обратил на него мое внимание, хотя я замышлял совсем другое и был поглощен своими мыслями. Тогда я зажегся страстным желанием исследовать это явление и вынести на свет то, что было в нем скрытого».

Сочинение Гальвани «Трактат о силах электричества при мышечном движении» увидевшее свет в 1791 г. сводилось, в конечном счёте, к тому, что электричество «живёт» в теле лягушки (рис. 1.15).

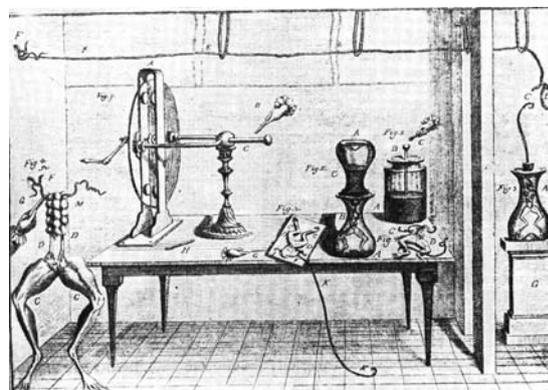


Рис. 1.15. Первые опыты Гальвани с «живым электричеством»

С лёгкой руки Гальвани учёные и обыватели активно заговорили о «живом электричестве». Сам Луиджи об этом писал так: «Из того, что мы до сих пор узнали и исследовали, можно, я полагаю, с достаточным основанием заключить, что живот-

ным присуще электричество, которое мы позволили себе обозначить вместе с Бертолонием и другими некоторым общим названием «животного». А почему бы нет? Существуют же электрические скаты и угри, почему бы не быть электрическим лягушкам, правда, менее выраженным».

К сожалению Луиджи Гальвани и его ассистент Бертолоний не придали значения тому факту, что сокращение мышечных тканей лягушачьих лапок происходило только в тех случаях, когда металлический предмет касался оголённого нерва.

Самой большой заслугой Гальвани является то, что на проблему его «животного электричества» обратили внимание серьёзные учёные и продолжили путь развития методов получения электрических источников энергии.

Своё открытие Гальвани сделал своевременно. Это к тому, что за сто с лишним лет до Гальвани в далёком 1678 г. учёный Швамердом демонстрировал герцогу Тосканскому конвульсии лягушачьих лапок, подвешенных на серебряной проволоке.

В Швеции в 1752 г. философ Иоганн Георг Зульцер среди прочих своих наблюдений, опубликовал следующее сообщение: «Если два куска металла, один – оловянный, другой – серебряный, соединить и приложить к их языку, то последний будет ощущать некоторый вкус, довольно похожий на вкус железного купороса, в то время как каждый кусок металла в отдельности не даёт и следа этого вкуса». Марко Кальдани в 1756 г. тоже препарировал бедных пресмыкающихся и тоже заметил, что тело мёртвой лягушки вблизи электрофорной машины содрогается, но не придавал, в отличие от Гальвани, этому факту никакого значения. Яичко дорого ко Христову дню.



Рис. 1.16. А. Вольта

Внимательно ознакомившись с работами Луиджи Гальвани итальянский физик Алессандро Вольта (1745 – 1827 гг.) усомнился в правильности выводов о происхождении электричества в теле лягушек и начал развивать эту тему в несколько ином, более научно обоснованном направлении.

Алессандро Вольта родился 18 февраля в городке Комо, который был расположен близ Милана в знатной дворянской семье с вековыми традициями. Как и многие гениальные люди, он по рождению был, слаб и тщедушен, угрожающе долго не говорил. Первое слово «нет» Алессандро произнёс в четыре года. После пяти лет развитие малыша пошло очень быстро.

В восемнадцать лет Вольта на равных активно переписывался с аббатом Ноле, того самого, который демонстрировал на мушкетёрах электрические эффекты с лейденской банкой.

Первые научные успехи и широкая известность в узких научных кругах пришла к нему после изобретения электрофорной машины, в настоящее время являющейся непременным атрибутом многих школьных кабинетов физики. Вольта первым из миланской профессуры начал преподавать физику не на латыни, а на родном итальянском языке.

Сочинение Гальвани «Трактат о силах электричества при мышечном движении» потряс Вольта настолько, что он перечитал его несколько раз и обнаружил то, что ускользнуло от внимания автора. Он установил, следуя подробнейшим описаниям экспериментов Гальвани, что все эффекты происходили, как отмечалось выше, при контакте лягушачьего нерва с металлическими инструментами, выполненными из разнородных металлов.

Вот оно озарение гениального человека. Тысячи читали трактат Гальвани, а этот пустячок упустили. Алессандро Вольта ставит серию опытов, заменив пресмыкающихся своим языком. Вот как описывает это сам Вольта: «Признаюсь, я с неверием и очень малой надеждой на успех приступил к первым опытам: такими невероятными казались мне, таким далёким от всего, что нам доселе известно об электричестве. Ныне я обратился, сам был очевидцем, сам производил чудное действие и от неверия перешёл, может быть, к фанатизму!».

Профессор Вольта брал две монеты из разных металлов: одну подкладывал под язык, а другую – на язык. Соединяя монеты провололочкой, он временами чувствовал солоноватый вкус. Каждый может ощутить этот вкус, если коснётся языком современного химического источника тока (батарейки), наиболее ярко действие электрического тока на язык проявляется при подобном испытании плоских батареек, с напряжением на электродах $U = 4,5 \text{ В}$.

Касаться клемм автомобильного аккумулятора могут себе позволить только люди с устоявшейся нервной системой. Но Алессандро Вольта сумел почувствовать на порядок меньший, еле уловимый «вкус» электрического тока.

Параллельно Вольта в своей университетской лаборатории повторял опыты Гальвани и всё более убеждаясь, что причины возникновения эклектических явлений не физиологического, а физического и химического характера. Наука об электричестве претерпела очередной раскол.

Образовались два научных клана: «вольтианцы» и «гальванианцы». Первые во всех опытах с лягушками и другими животными начисто отметали животных – как источник электрического тока; вторые, наоборот, считали что «животное электричество» существует и мышечные ткани способны его вырабатывать.

Параллельно с «борьбой» со сторонниками физиологических причин электрических явлений, Вольта проводит серию экспериментов, направленных на усиление обнаруженного им эффекта возникновения электрического тока в щелочной среде (слюне).

Вольта испытал на себе все доступные ему металлы и выстроил ряд их активности, так называемый ряд напряжений металлов: Zn, Cu, Ag. Чем дальше друг от друга отстоят металлы, тем более они эффективны при производстве электрического тока.

Конечно современный ряд несколько длиннее вольтова (Zn, Fe, Sn, Pb, Cu, Ag, Pt, C), но не надо забывать, что Вольта был первый. Вольта выбрал два металла – цинк и серебро и продолжил свои поиски способов дальнейшего усиления эффекта.

Итоги своих поисков вольта изложил в 1800 г. в письме президенту Лондонского королевского общества сэру Джозефу Бэнксу: «Да, устройство о котором я говорю и которое непременно привело бы Вас в изумление, представляет собой нечто иное, как некоторое число хороших проводников, расположенных друг за другом в определённой последовательности. 30, 40, 60 и более пластин из меди, лучше из серебра, каждая из которых сложена с пластинкой из олова, но гораздо лучше из цинка, и столь же большое число прослоек из воды или любой другой жидкости, проводящей лучше, чем обыкновенная вода, например солёная вода, щёлк и т.п., или куски бумаги или кожи и т.п., пропитанные указанными жидкостями. Эти куски вставляются между пластинами каждой пары или в каждый контакт двух различных металлов. Такое чередование проводников трёх родов, всегда в одной и той же последовательности, – всё из чего состоит новый прибор, который, как уже говорилось, производит действие такого же рода, как лейденские банки...».

В этой записке Вольта описывает свой знаменитый **вольтов столб**, т.е. последовательное соединение ячеек, состоящих из пластинок разнородных металлов и прокладок, пропитанных растворами кислот или щелочей.

Но столб появился позже, вначале прибор для производства электричества, описанный в трактате «Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением различных проводящих веществ», представлял собой довольно громоздкое сооружение (рис.1.17), в котором вместо прокладок из кожи или картона использовались специальные деревянные сосуды.



Рис.1.17. Установка Вольты для производства электричества

В сосудах, заполненных проводящими жидкостями, помещались пластины, выполненные из цинка и серебра. Когда габариты батареи уменьшились до размеров, соизмеримых с размерами стола, Вольта решился продемонстрировать своё творение консулу Франции Наполеону Бонапарту (рис. 1.18)



Рис. 1.18. Вольта демонстрирует свой прибор Наполеону

Совершенствуя конструкцию источника тока Вольта пришёл к идее столба, когда кружки разноимённых металлов, разделенные войлочными промежутками и соединённые последовательно, помещались в цилиндрические стеклянные или деревянные банки, наполняемые растворами кислоты или щёлочи (рис. 1.19). Это был, так называемый, вольтов столб – прообраз современных химических источников электрического тока, самого распространённого и теперь для питания всевозможных малогабаритных электрических и электронных устройств.

Вольтов столб принёс своему создателю заслуженную славу и почёт. Французы, весьма революционно во всех отношениях настроенная в то время нация, обрушивает на Вольту град внимания.

В его честь чеканится медаль, а первый консул Директории небезызвестный генерал Бонапарт основал фонд в 200000 франков для "гениальных первооткрывателей" в области электричества и первую премию вручает автору столба.

Помимо прочего Вольта становится рыцарем Почетного легиона, Железного креста, получает звание сенатора и графа, становится членом Парижской и Петербургской академий наук, членом Лондонского Королевского общества, которое награждает его Золотой медалью

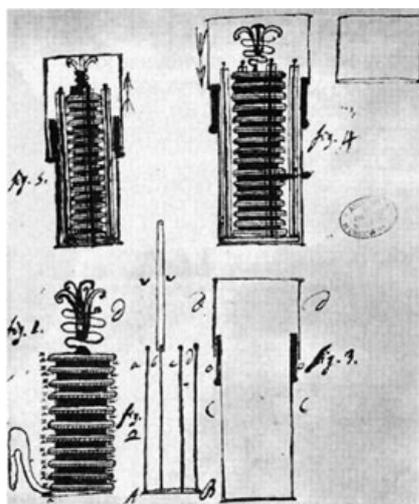


Рис. 1.19. Вольтов столб (чертёж автора)

Коплея. Вольта в естествознании являет собой редкий случай учёного, когда ему воздаётся по заслугам его ещё при жизни.

Историки и учёные едины во мнении, что создание "вольтова столба" было, как бы сказали современные политики, судьбоносным событием в электрической науке, оно стало прочным фундаментом для целого ряда современных естественнонаучных отраслей, прежде всего для современной электротехники и электроники, оказав, трудно сравнимое с чем-нибудь другим, влияние на всю историю человеческой цивилизации.

Неудивительно, что современник Вольты французский академик Доминик Франсуа Жан Араго (1786 – 1853 гг.) считал открытие Вольты **«... самым замечательным прибором, когда-либо созданным людьми, не исключая телескопа и паровой машины».**

Как только в распоряжении учёных попал источник постоянного тока, который мог по началу несколько минут обеспечивать на своих клеммах относительно постоянную разность потенциалов, открытия новых свойств и возможностей электричества стали появляться на страницах научных, технических и популярных журналов невиданно часто. Вольтовы столбы строили в Европе, Азии и Америке. Их усовершенствовали, их делали более удобными, но идеология была всё та же.

Одним из самых известных энтузиастов модернизации химических источников тока был профессор физики Петербургской Медико-хирургической академии Василий Петров (1761 – 1834 гг.). Василий Владимирович родился в г. Обояни, что под Курском, в семье приходского священника. Учился в Харькове, потом преподавал математику и физику, а в 1833 г. стал вначале экстраординарным, а затем и ординарным профессором медико-хирургической академии.

Научные интересы Петрова простирались на метеорологию, химию и физику. Первая его научная работа «Собрание новых физико-химических опытов и наблюдений», вышедшая в свет в 1801 г. привлекла внимание серьёзных учёных обоснованной критикой теории флогистона (теплорода), особой жидкости, ответственной за передачу и преобразование тепла. Петров экспериментально доказал, что процесс горения возможен только в присутствии кислорода, флогистон и теплород тут не причём.



Рис. 1.20. Батарея В. Петрова

В 1802 г. он изготовил источник тока высокого напряжения (около 1700 В), состоящий из 2100 медно-цинковых элементов (рис. 1.20). Грандиозность реализованного профессором Петровым замысла становится понятной, если учесть что в Европе строили источники, состоящие из 15 – 20 элементов. Вскоре после ввода батареи в эксплуатацию в 1803 г. Петров опубликовал в работе «Известие о «гальвани – вольтовских опытах» сообщение о наблюдаемой им электрической дуге, которую назвали «вольтовой».

Профессор писал о чрезвычайно ярком свете, подобном солнечному «...тёмный покой довольно ясно освещён быть может...» и высокой температуре в зоне электрического разряда. Петров один из первых экспериментально подтвердил химическую природу нового источника энергии.

Петров в своих опытах использовал медно-цинковые элементы, помещённые в раствор серной кислоты.

Вольта прожил 82 года, ему посчастливилось ощутить всю великую роль сделанных им открытий для развития стратегических направлений нынешней цивилизации. Человечеству пришлось ждать 142 года до появления атомного котла – ап-

парата, рождение которого по своим последствиям можно, весьма условно сравнить с изобретением вольтова столба. Экология и безопасность, дамы и господа!!!!!!!

Одним из первых явлений, которое наблюдал Вольта при исследовании батареи, был процесс разложения солей и окисление металлических пластинок. Электрохимические явления, строго говоря, не были открытием. Способ восстановления окислов металлов посредством электрических разрядов открыл в 1799 г. Беккариа. Химическое действие тока на систематической основе проводили Хемфри Дэви (1778 – 1829 гг.), Джованни Фабброни (1752 – 1822 гг.). Это из того, что опубликовано.

Следующим обнаруженным эффектом было **тепловое действие электрического тока**. Это было самое наглядный эффект, производимый электрическим током.

Уже в 1802 г. Кюрте заметил, что при замыкании полюсов батареи возникают столь обильные искры, что они «распространяли такой яркий свет, что даже сияние солнечного диска казалось слабым по сравнению с ним».

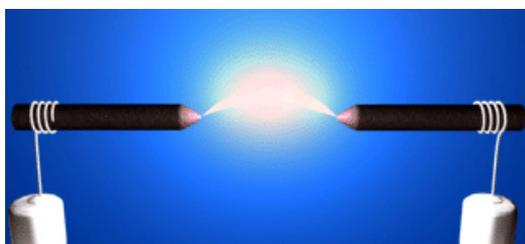


Рис. 1.21. Электрическая дуга

В 1810 г. профессор Дэви с помощью большой батареи, состоящей из 2000 элементов «впервые» продемонстрировал электрическую дугу. Петров явление дуги наблюдал и демонстрировал студентам ещё в 1802 году, но шумихи по этому случаю не поднимал, были не ясны теоретические аспекты (рис. 1.21).

Сам Дэви по этому поводу писал: «... когда же оба куска угля стали удалять друг от друга, образовался непрерывный разряд через раскалённый воздух на расстоянии, по крайней мере, в четыре дюйма (около 9 см) в виде необыкновенно яркой широкой световой дуги конической формы, обращённой выпуклостью вверх».

Дэви обнаружил, что электрическая дуга имеет большую температуру, достаточную для плавления металлов, даже платины «как будто то был воск в пламени свечи». Объяснения этому эффектному явлению не было.



Рис. 1.22. Герг Симон Ом

Особенности протекания электрического тока через проводники были исследованы Георгом Симоном Омом (1789 – 1854 гг.), после того как был изобретён и построен гальванометр.

На исследования в области проводимости металлов, как это ни покажется странным, Ома вдохновила работа Жана Батиста Фурье (1768 – 1830 гг.) «Аналитическая теория тепла».

Ома посетила мысль о возможности применения теории Фурье о тепловом потоке к электрическому току в проводнике.

В теории Фурье тепловой поток возможен благодаря разности температур, между двумя точками одного и того же тела. В теории Ома электрический ток объясняется разностью «электроскопических сил» в двух точках проводника.

Ом вводит понятные и точные определения электродвижущей силы и силы тока, что позволяет ему сформулировать взаимосвязь между изменениями разности потенциалов, силы тока и сопротивления.

Но теоретические и экспериментальные исследования Ома, как это часто случается среди людей, остались не замеченными современниками. Если кто и упоминал о них, то исключительно чтобы «высмеять болезненную фантазию, единственной целью которой является стремление принизить достоинство природы». Лишь более десяти лет спустя гениальные работы Ома начали пользоваться заслуженным вниманием.

Работы Ома использовал в 1841 г. для исследования тепловое действие тока Джеймс Прескотт Джоуль (1818 – 1889 гг.), который установил, что при одной и той же силе тока количество выделяемого тепла пропорционально сопротивлению проводников. Такова не полная история развития представлений о законах постоянного электрического тока.

Этот, как его называли современники, неистовый корсиканец прославился не только тем, что проиграл войну России и в его честь назван коньяк, но и целенаправленным и постоянным вниманием к наукам в целом и к умным людям в частности.

Случилось так, что Наполеон способствовал развитию наук и привлекал способных людей. Одной из причин такой нетипичной страсти государей к просвещению, сравнимой, пожалуй, только с увлечениями женщинами и войнами, может служить тот факт, что в молодые годы учителем никому ещё неизвестного артиллерийского офицера был великий французский астроном, математик и физик Пьер Симон Лаплас (1749 – 1827 гг.), которого потом монарх пожаловал чином министра внутренних дел. Как и следовало ожидать, министр он был никакой.

Наполеон (рис. 1.23) писал по этому поводу: «Великий математик не потратил много времени на то, чтобы показать себя никому администратором. Он везде умудрялся находить мелочи, а не проблемы, и вносил дух бесконечно малых в администрацию».

Во время своего правления Наполеон подражая Александру Македонскому собирал вокруг себя лучшие умы Франции и завоёванных им государств.

Рядом с Наполеоном можно встретить имена: великого геометра Госпара Монжа (1746 – 1818 гг.), физика и химика Гей-Люссака (1778 – 1850 гг.), путешественника и географа Александра фон Гумбольта (1769 – 1859 гг.), астронома и физика Араго, французского химика Клода Луи Бертолле и великого Лапласа.

В окрестностях Парижа, в тихой деревне Аркуэлле при непосредственной поддержке Наполеона было организовано научное общество с достаточно хорошо оснащёнными лабораториями.

В двух относительно больших домах, где жили Лаплас и Бертолле, часто проходили научные диспуты, на которых присутствовал иногда и Наполеон.

Ламартин, не принадлежавший к сомну учёных раздражённо писал: «...только цифрам всё разрешали, только цифры чествовались, осыпались благами и награждались».

Известен случай, когда Наполеон, уже будучи первым консулом, посетил 7,12 и 22 ноября 1801 г. лекции Вольты и после первого же сообщения разразился пыл-



Рис. 1.23. Наполеон Бонапарт

кой речью, в которой приезд итальянского учёного считает «крупной вехой» в развитии французской науки. Наполеон пообещал поощрять материально авторов крупных открытий и изобретений. Вольт из рук наполеона получил золотую медаль. Лучшей поддержки теории электричества, учитывая популярность сведённых судьбой людей, трудно себе представить. Телевидения то в те времена не было совсем.

Наполеон настолько был увлечён лекциями Вольты и комментариями сопровождающих его учёных, что поручил министрам учредить ежегодную премию в 3000 франков (по тем временам совершенно впечатляющая сумма) за лучшие работы в области «вольтаического электричества».

Наполеон не ограничился одной премией: «Я желаю для ободрения исследователей учредить премию в 60 000 франков тому, кто своими экспериментами и открытиями продвинет электричество и гальванизм до уровня, сравнимого с уровнем исследований Вольты и Франклина. Иностранцы тоже должны допускаться к конкурсу на равных основаниях».

Премии Наполеона по тем временам были столь внушительными, что многие учёные естествоиспытатели переключили свой интерес на исследования, связанные с законами электричества. Но большой приз, по решению комиссии, состоящей из Лапласа, Кулона и Био, так ни разу выплачена не была. Никак не могли выбрать самого достойного, а делить между собой в те времена, было не принято. Малые призы, которые, кстати, были тоже по тем масштабам цен совершенно не хилые, вручались неоднократно.

Во Франции это была золотая пора электричества, рождались один за другим законы электричества и магнетизма. На научной арене появились имена, часто произносимые и в наше время.

Во-первых, Био, Савар и Лаплас увековечили себя, сформулировав один из основных законов электродинамики, во-вторых, Ампер предложил учёному люду свою теорию электричества, в-третьих, Араго установил влияние вращающегося стального диска на поведение магнитной стрелки.



Рис. 1.24. Лаплас

Самым взрослым в аркюэльском сообществе был Пьер Симон Лаплас (рис. 1.24). В достаточно молодом возрасте Лаплас встретился со знаменитым д'Аламбером (1717 – 1783 гг.), который обратил внимание на юношу и рекомендовал его преподавателем математики в военной школе, где он и получил профессорское звание.

Именно в военной школе свела судьба ученика – Наполеона и профессора – Лапласа. Современники говорили о Лапласе: «Лаплас был рождён всё довести до совершенства, всё исчерпать, решить всё, что решению поддаётся».

Образование Лаплас начал получать в школе религиозного ордена бенедиктинцев, где много внимание уделяли богословию и смежным с ним наукам. После окончания школы Лаплас стал убеждённым атеистом.

В период директории Лаплас принял активное участие в реформе среднего и высшего образования Франции. В 1790 г. был назначен председателем Палаты мер и весов, руководил введением новой метрической системы единиц.

Главное научное увлечение Лапласа – небесная механика, в частности баллистика. Фундаментальными являются работы Лапласа по теории дифференциаль-

ных уравнений, которые он впервые предложил решать методом «каскадов». Лаплас разработал математические основы теории вероятностей, которая явилась платформой для статистического подхода в различных естественнонаучных отраслях знаний.

Всеобъемлющее сочинение «Аналитическая теория вероятностей» издавалась при его жизни три раза – в 1812, 1814, 1829 гг. В области физики Лапласом были опубликованы работы совместно с Лавуазье по термодинамике.

В частности, о сути скрытой теплоты плавления и парообразования; исследования по горению водорода в кислородной среде; работы в области капиллярности привели Лапласа к открытию закона, носящего его имя.

Лаплас был универсалом. Заинтересовавшись акустикой, он вывел формулу для скорости звука в воздухе, точностью, которой удалось удивиться, когда подоспели точные отметчики времени и методики непосредственного инструментального измерения.

Лапласу принадлежит так же знаменитая **барометрическая формула**, определяющая зависимость атмосферного давления от высоты. Эта зависимость до настоящего времени используется в авиационных измерителях высоты, альтиметрах.

Лапласом были развиты математические основы небесной механики. Используя представления математическими рядами взаимные возмущения планет, он подтвердил справедливость гравитационного закона Ньютона для вычисления орбит всех небесных тел.

Проведя по своей методике расчеты, Лаплас установил, что кольца Сатурна не могут быть сплошными, что подтвердилось оптическими наблюдениями. Но самым практичным и известным стал **закон Био – Савара – Лапласа**.

Жан Батист Био (1774 – 1862 гг.) окончил Политехническую школу и с 1800 г. занял должность профессора в Колледже де Франс, а с 1809 г. стал профессорствовать в Парижском университете. Био участвовал в экспедиции, которая впервые измерила протяжённость меридиана, потом он занимался небесной механикой и молекулярной физикой.

В 1804 г. совместно с Гей – Люссаком совершил полёт на аэростате. Но главным для себя считал увлечение электричеством и магнетизмом. Био совместно с Саваром много и увлечённо экспериментировали с токами и магнитными полями.

Феликс Савар (1791 – 1841 гг.) был врачом по образованию, но увиденные однажды публичные опыты по электричеству и захватывающие дух средневековые страшилки о магнитах и магнетизме привели его в физическую лабораторию, где он преуспел в акустике, магнетизме и оптике.

Савар весьма успешно занимался физическими основами конструирования музыкальных инструментов. Савар смог объяснить с позиций волновой механики некоторые тайны старых итальянских мастеров, изготавливавших скрипки совершенно фантастического звучания.

Прежде всего Савар объяснил, почему такой маленький по размерам инструмент имеет столь высокую громкость звучания. Оказалось, что всё дело в конструкции корпуса скрипки, который представляет собой сложную многомодовую связанную колебательную систему. Кстати, даже современными методами физической акустики произвести точный расчет не удаётся.

Георг Симон Ом родился в марте 1787. Как бы сказали сейчас, он был пролетарского происхождения, отец работал слесарем. Мать умерла рано, когда Симону ещё не исполнилось 10 лет. Образование Ом начал в гимназии при университете. После гимназии Ома потянуло на философию, он выбрал философский факультет Эрлангенского университета. Однако более философии молодого человека внезап-

но привлекли физика и математика, в которых он преуспел настолько, что после третьего семестра обучения был приглашён на должность учителя математики в одну из частных школ града Готтштадта в Швейцарии.

Ом прервал образование и до 1811 г. преподавал, а затем вернулся в университет за тем, чтобы получить степень доктора философии и занять должность приват-доцента на университетской кафедре математики.

Первая научная работа Ома была методического характера «Наиболее оптимальный вариант преподавания геометрии в подготовительных классах». Начиная с 1817 г. Ом вплотную занялся электричеством.

Внимательно ознакомившись с конструкцией крутильных весов Кулона, Ом на их основе создал электроизмерительный прибор. С помощью прибора выполнил исследования, которые были обобщены в статье «Предварительное сообщение о законе, по которому металлы проводят контактное электричество», помещённой в «Журнале физики и химии» в 1825 г.

Однако данные этой работы Ома не выдержали проверку экспериментами других исследователей и были преданы забвению. Но Ом был настойчив, он устранил источники ошибок и опубликовал новую статью «Определение закона, по которому металлы проводят контактное электричество, вместе с наброском теории вольтаического аппарата и мультипликатора Швейггера»

В мае 1827 года Георг Симон Ом представил в редакцию статью объемом 245 страниц «Теоретические исследования электрических цепей». В этой статье Ом нашел простую формулу для участка электрической цепи, не содержащего ЭДС:

Идея этой теоретической работы, основанной на ранних экспериментах автора заключалась в следующем: «Величина тока в гальванической цепи прямо пропорциональна сумме всех напряжений и обратно пропорциональна сумме приведенных длин. При этом общая приведенная длина определяется как сумма всех отдельных приведенных длин для однородных участков, имеющих различную проводимость и различное поперечное сечение».

В этой же работе уже использовался термин «электрическое соединение» и был сформулирован закон – закон Ома, который и в настоящее время является одним из основных законов практической и теоретической электротехники. В мае 1842 года Лондонское Королевское общество избрало Георга Симона Ома своим членом и наградило золотой медалью.

Во все времена параллельно с исследованиями электрических явлений люди интересовались и магнитными явлениями, причём трудно с уверенностью сказать, какое из проявлений было обнаружено вначале.

Одним из первых источников магнитного поля, ставших доступным для применения, был постоянный магнит. О магнитах и магнетизме написано с древнейших времён очень много, причём писали люди в науках весьма известные: Пифагор (VI в до с.л.), Гиппократ (V в до с.л.), Платон (V в до с.л.), Эпикур (IV в до с.л.), Аристотель (III в до с.л.), Клавдий (II в до с.л.), Плутарх (I в до с.л.), Птолемей и др.

В прежние времена природные постоянные магниты представляли собой куски магнитного железняка (магнетита), состоящего из 31% FeO и 69% Fe₂O₃.

В разных странах магниты называли по-разному. Китайцы, например, называли его «чу-ши», греки использовали сразу несколько названий «адамс», «каламита», «геркулесов камень», индусам более подошло слово «тхумбака», а англичанам – «лоудстоун». Разные по звучанию слова, как правило, имеют сходные переводы, созвучные с понятиями «любящий» или «любовник».

Открытие природного магнетизма сопровождалось многочисленными легендами и преданиями, связанными с необычными свойствами этого явления. В соот-

ветствии с одной из легенд, записанной в древнем греческом манускрипте, в далёкие времена по обетованным землям странствовала ватага мастеров, которые помимо ремесленных услуг населению, изумляли древние народы разного рода чудесами. Они заставляли висеть в воздухе металлические кольца, перемещали взглядом предметы, заставляли украшения собираться в различные узоры.

Трудно сейчас установить, кто впервые обратил внимание на способность постоянных магнитов ориентироваться определённым образом в пространстве. Есть все основания полагать, что этот факт затерян в глубинах истории нашей цивилизации, возраст у которой, как полагают многие учёные, намного больше, принятого в официальных документах. Вопрос об открытии магнитных свойств нашей планеты до настоящего времени вызывает среди специалистов горячие споры.

Открытия археологов последнего времени показали, что древние китайцы в IV в. до с.л. уже знали о магнетизме и использовали свойства магнитов притягивать металлы, примерно в этот же период времени обнаружилось свойство магнитов ориентироваться в пространстве определённым образом. Китайские мудрецы объясняли это влиянием Полярной звезды. Этот эффект, по началу, использовался для предсказания судеб. Гадальный прибор, прообраз первого китайского компаса (рис. 1.25) состоял из «ложки», способной вращаться на горизонтальной пластине, «ложка» устройства изготавливалась из куска естественного магнита, на пластине были нанесены знаки зодиака.



Рис.1.25. Прибор для гадания, прообраз первого китайского компаса

Обнаружив, что гадальный прибор имеет определённую ориентацию, его переименовали в «указатель юга». Очевидно, это был прообраз компаса. В древних китайских письменах (III в. до н.э.) «указатель юга» упоминается как хорошо известный прибор, используемый на наземном и морском транспорте.

Конструкции «указателей юга» (рис. 1.26) были самыми разнообразными, характерно, что китайские конструкторы с целью повышения точности указателей, делали их плавающими в жидкости или вращающимися на острие. Как правило, это были фигурки рыб, животных и драконов. Внутри фигурок помещались куски природного магнита, которые и были основой указателей.

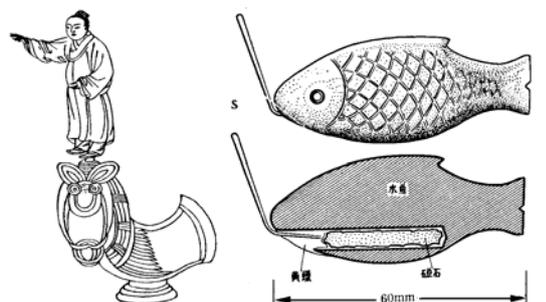


Рис. 1.26. Указатели юга Древнего Китая

Как это принято у людей с древнейших времён, все достижения человеческого разума первым делом применялись для истребления себе подобных. Компас в древнем Китае был установлен на дышла боевых повозок, которые совершали рейды по бескрайним степям Монголии. Конструкция компаса впервые была описана в китайской энциклопедии в 121 г. до с.л., изданной Гуи Чинем.



Рис. 1.27. Компас Древнего Китая

тые походы Русских князей, Олега, в частности, через Чёрное море и Гибралтар к стенам Константинополя (Царьграда), с целью прибивания, чтоб не забывались, булатного щита.



Рис. 1.28. Компас Викингов



Рис. 1.29. Моделирование явления «Гроб Магомеда»

бретения использовался исключительно для услаждения взора, им начинались ракеты для фейерверков.

Европейцы, изобретая компас вторично, уже не верили в звёздную первопричину явления. Если бы магнитным ориентиром служила Большая Медведица или, как у древних китайцев, Полярная звезда, то через каждые 12 часов стрелка поворачивалась бы примерно на 1° , отслеживая видимое круговое движение звезды на небосклоне.

Ещё Колумб обнаружил несостоятельность «звёздного магнетизма». Путешествуя из Испании в Западную Индию, он обнаружил, что к западу от Азорских ост-

В X веке, т.е. более чем за 100 лет до испанцев компас в Китае принял вид, мало, чем отличающийся от современного (рис.1.27). Он имел вытянутую магнитную стрелку, помещаемую на острие и специальную шкалу с обозначениями стран света.

Братья северные и южные славяне, прежде всего викинги, тоже истари были склонны к дальним морским путешествиям, причём их боевые корабли были куда как совершеннее истинно европейских.

Достаточно вспомнить путешествия викингов в северную Америку и Европу и знаменитые

Вначале славяне использовали путеводные камни, куски магнитного железняка, подвешенные на шёлковой нити. Затем научились изготавливать из магнитных материалов методом холоднойковки лёгкие диски, устанавливаемые на немагнитных остриях (рис. 1.28).

Широкая известность китайских и славянских конструкций указателей направления, тем не менее, не мешает испанцам считать себя первыми. Они поставили в Неаполе шикарный памятник Флавио Джойя, которому удалось таки в 1302 г., уже современного летоисчисления, «открыть» компас, для испанцев.

Из множества старинных упоминаний о магнетизме следует выделить рассказ Матилла о часовне Магомета, свод которой был изготовлен из магнитного материала, между сводом часовни и полом парил гроб Магомета.

Восток – дело тонкое! Великие изобретения на востоке появляются в начале в виде неких забав и развлечений, а уж потом к ним присматривались и находили более практичные применения.

Так произошло с компасом, аналогичная история постигла и порох, который после его изобретения

ровов стрелка компаса, указывающая на северо-восток, вдруг повернулась на целую четверть круга к северо-западу. Среди экипажей судов это вызвало потрясение. Представьте себе «пляшущую» Полярную звезду. Не представляете?

Вот и команды судов, обнаружив Полярную звезду на своём «законном» месте усомнились в исправности компасов и потребовала повернуть назад. Колумбу пришлось сочинить целую историю, подкреплённую «научными» доводами о, якобы, не совсем правильном поведении Полярной звезды. Парусники продолжили плавание, которое, как известно, по одной из версий закончилось открытием Америки.

Когда Вильяму Шекспиру было уже 24 года, в небольшом уютном английском городке Колчестере, что близ Лондона, родился ещё один Вильям, на этот раз Джильберт (Гильберт) (1544-1603 гг.), который первый во всей мире написал научную работу по магнетизму.

Окончив среднюю школу, Джильберт был определён в школу Святого Джона в Кембридже, где он стал бакалавром, магистром, а потом и доктором медицины. Врачебная карьера этого англичанина складывалась блестяще, будучи ещё молодым, он стал придворным врачом королевы Елизаветы.

Сейчас уже точно не установить, почему Гильберт заинтересовался магнетизмом. Одной из причин, наверное, явилась широкая популярность истолчённых магнитов в качестве лекарственного средства.

Магнитные порошки у средневековых лекарей считались как сильнодействующее слабительное. Известно, что сам Гильберт одно время считал, что магнитное железо «... возвращает красоту и здоровье девушкам, страдающим бледностью и дурным цветом лица, так как оно сильно сушит и стягивает, не причиняя вреда», другими словами, магнит можно рассматривать, по мнению Гильберта, как эффективное средство от морщин.

Потчевал ли лейб-медик толчёными магнитами царственную особу, доподлинно не известно, но известно, что Гильберт обнаружил некоторые побочные свойства «лекарства». Он писал в своём дневнике: «... Магниты при приёме внутрь иногда вызывают мучительные боли во внутренностях, чесотку рта и языка, ослабление и сухотку членов». Будучи исследователем, по натуре, Гильберт подверг тщательному анализу всё, что было известно в Европе о магнитах и магнетизме. А известно было, по сути, не многое.

Сведения, в большинстве своём, носили более чем фантастический характер. Считалось, например, что под хвостом Большой Медведицы имеется огромной силы магнитный камень.

Одно время бытовало мнение, что приём магнитного порошка внутрь в малых дозах продлевает молодость. А если магнит положить под брачное ложе, то он будет охранять целомудрие супругов (в это свято верили крестоносцы, отправляясь в дальние походы во имя идеалов своей веры).

Считалось, что если магнит натереть чесноком и положить рядом с бриллиантами, то сила магнита исчезнет, а если магнит смазать кровью козла, то его сила восстанавливается.

В течение 18 лет Гильберт ставит бесчисленные опыты с магнитами, отделяя зерна от плевел. В 1600 г. все свои изыскания он объединяет в своей знаменитой работе «**О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле**». Не страдая излишней скромностью, Гильберт впервые в истории книгопечатания ставит свою фамилию впереди названия книги. Позже Галилей скажет о нём: «**Джильберт велик до такой степени, которая вызывает зависть. Заслуги его действительно впечатляли, он открыл магнитные свойства Земли**».

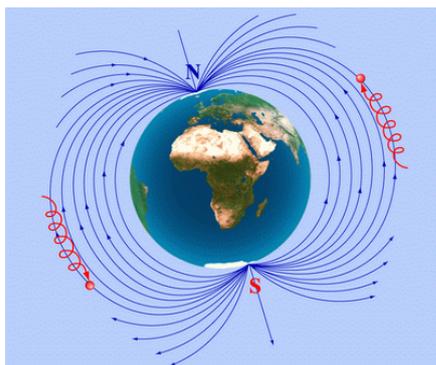


Рис. 1.30. Магнитное поле Земли

Взяв кусок магнетита, Гильберт изготовил из него шар – терреллу (землицу). Помещая вблизи терреллы магнитную стрелку, он обнаружил, что поле шара очень напоминает магнитное поле Земли. У терреллы с помощью компаса в явном виде обнаружались магнитные полюса и экватор (рис. 1.30).

В наше время, когда узкая научная специализация, вызванная информационным бумом, достигла преабсурдного уровня, открытия случаются, тем не менее, не так уж часто.

Толи делать их стало сложнее, толи кругозор учёных не позволяет обнаруживать истины на стыках разнородных областей знаний. Но, тем не менее, это факт. Век XIX, предшествующий прошлому веку, был замечателен учёными – универсалами, знания и пристрастия которых поражают своей широтой и разнообразием.

Мы уже отмечали таких универсалов как Роберт Гук, Томас Юнг, Ньютон, Ломоносов Михайло Васильевич и др. Такого же высокого класса учёные с паразитическим спектром научных интересов работали и в области электричества и магнетизма. Джероламо Кардано (1501 – 1576 гг.), Уильям Гильберт (1544 – 1603 гг.), Отто фон Герике (1602 – 1686 гг.) и другие.



Рис.1.31. Ханс Кристиан Эрстед

Вот, например, датчанин Ханс Кристиан Эрстед (1777 – 1851 гг.), при окончании Копенгагенского университета в 1797г. получил диплом фармацевта и получил золотую медаль не за успехи в физике и математике, а за литературное эссе «Границы поэзии и прозы» (рис. 1.31).

Одновременно им было выполнено исследование в области химии о свойствах щелочей. А спустя два года, уже в 1799 г. он стал доктором философии, представив оригинальное исследование в области медицины.

Как это ни покажется парадоксальным с позиций нашего времени, но первые научные работы были выполнены Эрстедом по химии и медицине, а профессором он стал в области физики. Познакомившись с работами Вольты, Эрстед настолько увлекся идеями и теориями электричества, что все прочие научные интересы прекратили для него существование.

Пропуская электрический ток по платиновой проволоке, Эрстед наблюдал **выделение тепла**. Взаимосвязь электричества и тепла заинтересовала учёного, он начал целенаправленно искать другие проявления электрического тока.

В 1813 г. в своём мемуаре «Исследование идентичности химических и электрических сил» Эрстед предлагает весьма неординарную идею: «**Следует испытывать, не производит ли электричество каких-либо действий на магнит**». Сейчас эта мысль не кажется оригинальной, взаимосвязь электричества и магнетизма многократно доказана и очевидна, во времена же Эрстеда представления были несколько иными.

Практически всех исследователей поражала аналогия электрических и магнитных явлений, и в одном и в другом случае наблюдались силы притяжения и отталкивания.

Однако патриархи электрической науки, такие как Кардан и Гильберт и др. считали, что химические, электрические и магнитные явления существуют совершенно независимо друг от друга. И у них была своя логика.

Свойства природных магнитов кажутся совершенно, статическими, постоянными. Кроме того, магниты электрически нейтральны и, казалось бы, в магните нет никаких токов. Какая может быть взаимосвязь?

После того, как появились Вольтовы столбы, учёные могли достаточно продолжительное время поддерживать в цепях постоянную силу тока, попытки поиска аналогий участились и заняли до открытия Эрстеда целых 20 лет.

В соответствии с научными представлениями начала XIX века, все силы, имеющие место в природе, полагались ньютоновскими. Действие сил проявлялось по Ньютону только между материальными частицами или телами по прямой, соединяющей их центры. В этой связи все приспособления для обнаружения сил магнитного свойства строились из этих соображений.

Долгое время многие исследователи пытались намагнитить стальные иголки, пропуская через них электрический ток. Отрицательными были эксперименты по выявлению притяжения и отталкивания между постоянными магнитами и проводниками с током.

Поиск взаимосвязи между гальваническим и магнитным флюидом, как тогда именовали соответствующие поля, затянулся до 21 июля 1820 г. Именно в это время, вопреки мнениям авторитетов, Эрстед сделал своё знаменитое открытие, описанное им в мемуаре «**Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку**».

Термина электрический ток ещё не существовало. Эрстед, в частности, пишет: «Первые опыты по вопросу, рассматриваемому в настоящем труде, связаны с лекциями об электричестве, гальванизме и магнетизме, читаемые мною прошедшей зимой. Основной вывод этих опытов состоит в том, что магнитная стрелка отклоняется от своего положения равновесия под действием вольтаического аппарата и, что этот эффект проявляется, когда контур замкнут, и не проявляется, когда контур разомкнут... Кроме того, из сделанных наблюдений можно заключить, что электрический конфликт образует вихрь вокруг проволоки».

В современной терминологии, это означает, что магнитные силовые линии окружают проводник с током, причём магнитное поле имеет вихревой характер. Таково содержание первого закона электродинамики, это суть открытия Эрстеда.

Проведенные Эрстедом эксперименты ответили на два очень важных вопроса. Во-первых, была опытным путём доказана взаимосвязь электрического тока и магнетизма, во-вторых, взаимодействие электрического тока с намагниченными телами обнаружило силы не ньютоновского происхождения и свойства.

Сила, возникающая при взаимодействии электрического тока и магнитной стрелкой, направлена не по прямой, соединяющей центры взаимодействующих объектов, а по нормали к этой прямой. Сила является «поворачивающей», или по современной терминологии – сила, создающая вращающий момент (рис.1.32).

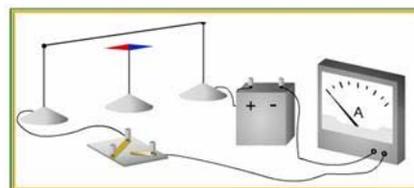


Рис. 1.32. Электрически ток и магнитная стрелка

Можно утверждать, что опыты Эрстеда, помимо прочего, впервые обнаружили отклонения от ньютоновской модели Мира.

После откровений Эрстеда многие отрывочные факты заплелись сами собой в одну теоретическую связку. Так, например, Араго, прочитав работу Эрстеда, сразу вспомнил, что ему часто, после грозы в открытом море приходилось наблюдать,

что стальные предметы намагничивались, а компасы начинали безбожно врать. Араго догадался, что причиной этих явлений была молния, представляющая собой кратковременный электрический ток, да ещё какой силы.

Первый, кто попытался объяснить опыты Эрстеда, был всё тот же Араго. Он предложил рассматривать проводник с током в виде магнита. Эта идея многим понравилась, однако для её реализации требовалось предположить наличие магнитных зарядов, по аналогии с природными магнитами.

Это лишний раз подчёркивает, что на начальных этапах разработки теории электромагнитных явлений интенсивно использовались электростатические аналогии. Предположение Араго стало менее состоятельным после экспериментов Ампера, который установил весьма важные количественные соотношения между параметрами тока в проводнике, его длиной и магнитной индукцией.

Имя этого учёного упоминалось неоднократно прежде при рассмотрении цепей постоянного тока и встретилось снова, теперь уже в магнетизме. Это даёт основание сказать о нём несколько слов.



Рис. 1.33. Андре Мари Ампер

Родился Андре Мари Ампер (1775 – 1836 гг.) в Лионе в семье коммерсанта и с раннего детства, как и подобает гениям, проявил способности в науках, а главное, огромное желание к образованию. Научившись рано читать, он в четырнадцатилетнем возрасте самостоятельно разобрался с основами дифференциального и интегрального исчисления.

Чтобы в подлиннике читать Л. Эйлера и Д. Бернулли была в темпе освоена латынь. Не прибегая к услугам старших товарищей, Ампер к пятнадцати годам проштудировал все 20 томов знаменитой энциклопедии Дидро и Даламбера, получив современные и разносторонние знания об окружающем его мире.

Время, в котором жил Ампер, было бурным во всех отношениях. Революция, республика, комиссары, гильотина – все эти слова вместе с кошмарами арестов и казней остались на долго в памяти весёлых и добродушных французов.

В 1793 г. по обвинению в контрреволюционной деятельности был арестован, а затем и казнён отец Ампера, а имущество семьи, как это было принято у комиссаров, конфисковали в пользу революции (!?).

Вот тут то и пригодились Амперу обширные сведения по различным отраслям знаний, надо было зарабатывать на жизнь. Ампер давал частные уроки физики и химии. Прославившись среди родителей учеников, Ампер вскоре получил место учителя в центральной школе г. Бурга.

Именно в этот, совсем не простой период своей жизни, Ампер написал свою первую работу в области теории вероятностей, которая была замечена специалистами и получила высокую оценку от Лапласа и Даламбера.

По ходатайству этих знаменитостей Ампер был переведён в Парижскую Политехническую школу, вначале репетитором, затем преподавателем, а в 1809 г. он был избран заведующим кафедрой высшей математики.

После смерти Лагранжа Ампер был избран действительным членом Института Франции (Академии наук).

Круг научных интересов Ампера был весьма широк. Очень серьёзные работы были опубликованы им по высшей математике, химии, ботанике, философии, и даже по зоологии. Но самых выдающихся результатов Ампер достиг в физике, а именно в теории электричества.

Главным научным достижением Ампера, несомненно, является «**Теория электродинамических явлений**», в которой он подвёл итог огромной серии экспериментов и построил на их основе теорию.

На страницах этого сочинения Ампера в научную терминологию введены два фундаментальных понятия электродинамики: «**Электрическое напряжение**» и «**Электрический ток**». Ему же принадлежит термин «**гальванометр**».

Ампер впервые установил наличие взаимодействия токов. Как уже упоминалось ранее, Ампер пришёл к совершенно гениальной догадке, что магнит является совокупностью микротоков.

Теория Ампера была создана по образцу и подобию «Начал» Ньютона, что дало основание Максвеллу назвать Ампера «Ньютоном электричества». А уж Максвелл в электродинамических делах имел авторитет, несомненно.

Амперу в жизни повезло больше, чем многим его коллегам, он при жизни пользовался заслуженным почётом и уважением, как у себя на родине, так и за её пределами. В частности, он был членом Петербургской Академии наук. А в жизни, по мнению его биографа Л. Белкинда, он был «скорее уродлив, чем красив», «одевался неряшливо, всегда ходил, на всякий случай с зонтом», «был неуклюж и неловок», «славился колоссальной рассеянностью».

Рассказывают такой случай. Идучи как-то по Парижу, Ампер производил в уме вычисления. Переходя улицу, он упёрся в чёрную блестящую доску. Не мало не сумяшися, Ампер извлёк из кармана непримечательный мелок и начал покрывать полированную поверхность бисером математических формул и цифр. Внезапно доска пришла в движение, и Ампер вынужден был последовать за нею, совершенно не обращая внимания, что пишет он ... на боковой стенке кареты.

Слава Ампера пережила и революционные потрясения, и Наполеоновские нескончаемые войны, и годы благополучия и спокойствия. Во Франции есть г. Ампер, существует железнодорожная станция его имени, создан научно-исследовательский центр Ампера, и даже музей Ампера. В международной системе единиц из четырёх основных лишь одна – ампер названа в честь учёного.

В 1820 г. Ампер установил, что на проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила. В чём состоит источник этой силы?

Размышляя над результатами опытов Эрстеда, Мари Амперу пришла в голову идея о взаимодействии двух проводников с током, которую он тут же проверил экспериментально, и описал посредством известного уравнения, которое впоследствии превратилось в уравнение закона Ампера

$$\vec{F}_A = I[\vec{L} \times \vec{B}],$$

где I – сила тока, \vec{L} – вектор длины проводника, \vec{B} – вектор магнитной индукции. Преобразовав прямолинейный проводник в цилиндрическую катушку (соленоид), Ампер обнаружил у неё, типичные свойства постоянного магнита, с явно выраженными полюсами, северным и южным (рис. 1.34).

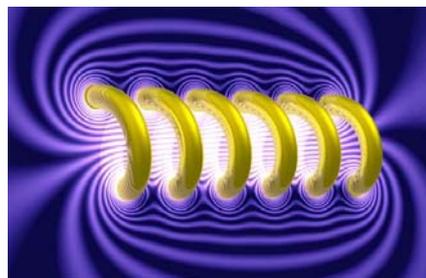


Рис. 1.34. Соленоид

Амперу удалось показать, таким образом, что маленький круговой виток с током эквивалентен небольшому магнетику, рас-

положенному в центре витка перпендикулярно его плоскости. По разумению Ампера, каждый контур с током можно заменить магнитом малой толщины.

В одной из многочисленных работ по электричеству и магнетизму Ампер высказал мысль, кстати, не замеченную современниками, которая на сто лет опередила его время. По предположению Ампера природные магниты представляют собой совокупность элементарных круговых токов. Заканчивая одно из своих выступлений на заседании Академии, Ампер уверенно заявил: «... В связи с этим, я свёл все магнитные явления к чисто электрическим эффектам».

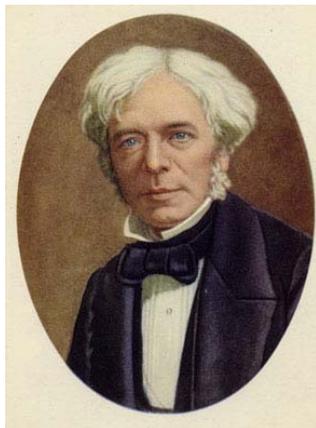


Рис. 1.35. Майкл Фарадей

Первым, кто заложил основы практического использования электродинамических теорий, несомненно, был Майкл Фарадей (1791 – 1867 г.). Уже в наше время, один из исследователей в области истории электродинамики справедливо заметил: «Работы других учёных – Кулона, Ампера, Арга – представляли собой отдельные «пики», тогда как Фарадей воздвиг «горную цепь» из взаимосвязанных работ».

Восхождение Майкла Фарадея (рис. 1.35) в вершинам научной славы началось в 1813 г., когда известный уже профессор Деви, пригласил его своим ассистентом в Королевский институт, организованный графом Румфортом.

Во время научных экспедиций по Европе вместе с Деви молодой учёный участвовал в многочисленных физических и химических экспериментах. Во Флоренции, к примеру, профессор с ассистентом с помощью большой линзы продемонстрировали, собрав в маленькое пятнышко солнечные лучи, что алмаз, помещённый в кислородную среду способен гореть.

Это подтверждало, что алмаз представляет собой, несмотря на уникальные механические и оптические свойства, одну из модификаций углерода. Звёздный час Фарадея, вместе с тем, связан с разработкой основ электромагнитной теории. **Закон электромагнитной индукции** Майкла Фарадея вынес окончательный приговор тем учёным, которые считали электромагнитные исследования бесперспективными для практического использования.

Электромагнитная индукция представляет собою явление исключительной научной и практической важности. Открытием этого замечательного явления мы обязаны сыну кузнеца и ученику переплетчика знаменитому английскому физическому Майклу Фарадею.

Краткая история этого открытия такова. Ампер в поисках общей точки зрения на электрические и магнитные явления пытался найти в области гальванических токов процесс, сходный с явлением электростатической индукции.

Казалось, что если статическое электрическое поле индуцирует также статическое поле, то движущееся должно индуцировать движущееся. Можно было бы ожидать, что в замкнутом контуре, находящемся вблизи другого контура с постоянным током, также должен течь постоянный ток, т. е. что наряду с электрической индукцией должна существовать и «гальваническая». Для обнаружения этого Ампер в 1822 г. ставил специальные опыты, однако, вопрос остался невыясненным.

Не смущаясь неудачами Ампера, поисками этого явления занялся Фарадей (1831 г.). Он обмотал деревянную катушку двумя изолированными проводами и присоединил концы одного из них к батарее из 10 последовательно соединённых элементов, а концы другого – к чувствительному гальванометру. Оказалось, что при этом гальванометр не даёт никаких отклонений.

Такой же отрицательный результат получился и тогда, когда Фарадей увеличил батарею до 120 элементов. Продолжая свои опыты с настойчивостью глубоко убежденного человека, он обнаружил, что гальванометр дает кратковременные отклонения лишь в моменты замыкания и размыкания цепи, содержащей батарею.

По словам Фарадея, индуцированный ток «походил скорее на волну из лейденской банки, чем на электрический ток из вольтовой батареи». Таким образом, Фарадей искал «гальваническую индукцию», а нашел электромагнитную, которую он называл «вольтаической».

Варьируя условия опытов, Фарадей нашел, что вместо того чтобы размыкать и замыкать ток в первичной сети, можно его ослаблять и усиливать.

Можно также, не изменяя силы тока в первичной цепи, приближать или удалять друг от друга обе катушки. Так как по теории Ампера постоянный магнетизм объясняется наличием молекулярных токов, то нужно было ожидать появления индукционных токов при приближении к контуру с гальванометром или удалении от него постоянного магнита. Это и удалось наблюдать Фарадею.

Индукционные токи появлялись и при введении железного сердечника в неподвижные относительно друг друга первичную или вторичную катушки и при удалении из них сердечника (рис. 1.36).

Наблюдалось также появление индукционных токов при поворотах мотка проволоки в земном магнитном поле.

При всяком перемещении магнита в замкнутом контуре создаётся ток, обладающий некоторым количеством энергии, которая может быть отдана цепи, например в форме тепла. Естественно предположить, что эта энергия обусловлена механической работой, совершаемой при движении магнита в области контура.

Далее Фарадей установил между полюсами магнита вращающийся медный диск (рис. 1.37) с которого посредством скользящих контактов, одного на периферии, а второго в центре диска, можно было снимать возникающее электрическое напряжение. Так возник первый, созданный руками исследователя электрический генератор, предоставивший, по сути, в распоряжение человечества **очередной энергетический источник**. После открытого огня, мускульной силы человека и животных, после энергии ветра, воды и пара, наступал черёд энергии электричества.

Следует отметить, что из всех научных открытий в области естествознания с самых древнейших времён до настоящего времени наибольшую широчайшую практическую значимость имеют исследования в области электромагнетизма. Достаточно посмотреть окрест. Даже невооружённым и не очень просвещённым взглядом видно, что электрические и магнитные явления, от электричества в бытовых розетках и до информационных возможностей Глобальной Сети, от мобильной телефонии до телевидения и радиосвязи являются энергетической и информационной основой современной цивилизации.

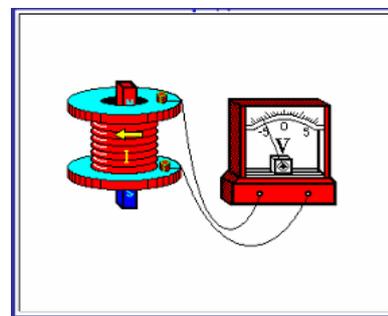


Рис.1.36. Взаимодействие магнита с катушкой



Рис. 1.37. Дискосый генератор Фарадея

1.2. Свойства электрических полей

Как отмечалось во введении, из глубокой древности было известно, что некоторые предметы, будучи натёртые кожей или шерстью, приобретали свойства притягивать мелкие предметы.

Этот эффект на уровне удивительных забав просуществовал до конца XVI в., до того как этим заинтересовался королевский медик Джильберт, который методом многочисленных экспериментов установил, что таким интересным свойством обладает не только янтарь (от греческого – электрон), но и многие другие вещества, например – эбонит, человеческие волосы (рис. 1.38) и многие другие вещества.



Рис. 1.38. Электризация волос

Джильберт справедливо предположил, что при натирании предметов ими приобретаются некие новые энергетические возможности, вызываемые трением. С приобретением новых энергетических свойств Джильберт был прав, а вот на счёт трения – ошибался.

Дело в том, что трение в данном случае «электризации трением» само по себе не имеет принципиального значения. Трение обеспечивая более плотное прижатие, способствует снятию поверхностных электрических зарядов. В отсутствие притирания тела ввиду природной шероховатости поверхности контактировали бы только в отдельных точках.

Было обнаружено, что некоторые материалы допускают перемещение «электричества» между отдельными частями тела, изготовленного из них, а другие – таким свойством не обладают.

Материалы, допускающие перемещение зарядов называли **проводниками**, материалы, не перемещающие заряды – **диэлектриками**. Разделение материалов на проводники и диэлектрики во многом условно, потому что электрические свойства веществ определяются в ряде случаев внешними условиями.

Так, например, газы в обычных нормальных условиях относятся к диэлектрикам. Однако при высоких температурах газы могут переходить в класс проводников. Меняют свои свойства газы и при облучении их светом ультрафиолетового излучения.

В ходе экспериментов было установлено, что в природе существуют электрические заряды двух сортов. Так, например, если два лёгких тела, заряженных от эбонитового стержня, натёртого мехом, привести в соприкосновение, то они станут отталкиваться.

Если же тела зарядить от стеклянного стержня и от эбонитового, то они будут притягиваться. На основании этого было принято заряды делить **на положительные и отрицательные**.

Попытки объяснить электрические явления заставляли искать аналоги с уже известными моделями физических процессов. Вспомнили о теплороде (он же флогистон) посредством которого удалось установить некоторые закономерности в термодинамике. А почему бы и нет.

Почему не ввести в рассмотрение особую электрическую жидкость, которая, подобно теплороду отвечает за, находящийся на теле электрический заряд. Так полагали достаточно длительное время, и на некоторые вопросы электричества удалось найти ответ.

Достаточно убедительно модель электрической жидкости объясняла процесс зарядки лейденской банки и перемещение электрических зарядов между телами.

Однако сомнения по поводу «жидкого электричества» возникали. Майкл Фарадей занимаясь разложением веществ при прохождении электрического тока через растворы обратил внимание, что при прочих равных условиях различные вещества осаждаются в разных количествах.

При использовании одновалентного вещества для выделения одного моля через раствор проходил электрический заряд $9,65 \cdot 10^4$ Кл, а когда в растворе присутствовало двухвалентное вещество, то требуемый заряд удваивался.

Фарадей совершенно обосновано предположил, что в растворах присутствуют частицы, несущие в себе одну или несколько порций элементарного электричества. Напрашивался вывод о дискретности электрического заряда.

К настоящему времени стараниями многих исследователей установлено, что самым маленьким по величине электрическим зарядом является электрон. Заряд электрона в этой связи называют элементарным.

Заряд электрона равен $e = (1,60217733 \pm 4,9 \cdot 10^{-7}) \cdot 10^{-19}$ Кл, масса электрона составляет $m_e = (9,1093897 \pm 5,4 \cdot 10^{-7}) \cdot 10^{-31}$ кг.

Столь исчерпывающие сведения о таком весьма малом объекте получены стараниями двух великих исследователей структуры нашего мира, англичанином Джоном Джозефом Томсоном и американцем Робертом Эндрюсом Милликенем. Считаю уместным, познакомить читателя с некоторыми интересными фактами биографии этих классиков естествознания.

В конце 1885 г. 18 декабря в обычной английской семье книготорговца родился Джозеф Джон Томсон (рис. 1.39), который подобно своему тезке Уильяму Томсону (1824–1907), получившему в 1892 г. за выдающиеся научные заслуги титул лорда Кельвина прославил своё отечество несколькими грандиозными открытиями, перевернувшими представление физиков о структуре вещества.

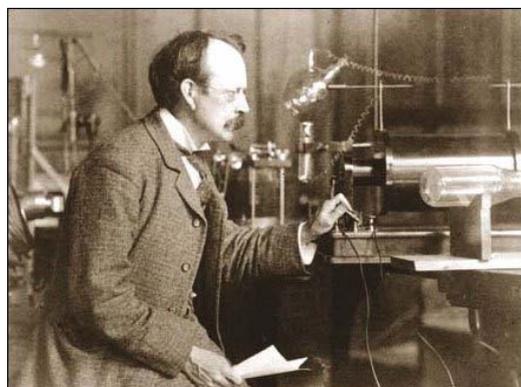


Рис. 1.39. Дж. Дж. Томсон

В отрочестве Томсон хотел стать инженером, для чего поступил в один из манчестерских технических колледжей, однако по экономическим причинам, в семье не было денег на обучение, становление инженера Томсона прекратилось.

В колледже Томсон посещал дополнительные занятия по физике, математике и химии и настолько поднатерел в этих науках, что смог поступить в Тринити-колледж при Кембриджском университете с правом получения стипендии.

В Тринити-колледже в своё время работал великий Ньютон. Томсон окончил университет в 1880 г. К этому времени Томсон уже сформировался как зрелый учёный, опубликовав несколько интересных работ в области электродинамики.

На юное дарование обратил внимание Рэлей, который рекомендовал Томсона вместо себя в директоры Кавендишской лаборатории.

Это произошло в 1884 г., когда Томсону исполнилось 28 лет. Годом позже Томсон с блеском защитил докторскую диссертацию на тему «О некоторых приложениях принципов динамики к физическим явлениям».

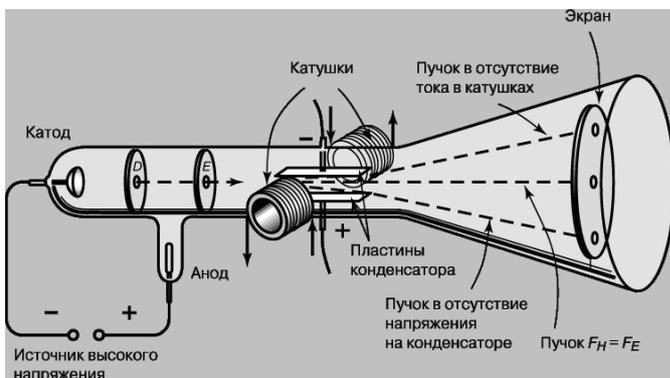


Рис. 1.40. Установка Томсона

Дальнейший взлёт на физический Олимп был связан с исследованием свойств катодных лучей (рис. 1.40). Томсон установил, что катодные лучи являются отрицательно заряженными частицами, и ему удалось измерить отношение заряда этой частицы к массе

$$\frac{e}{m_e} \cong 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Томсон получал поток заряженных частиц с катода и направлял их пучок на экран, покрытый люминофором. Проходя между обкладками конденсатора и катушками, пучок отклонялся, что позволило установить удельный заряд частиц составляющих пучок. Другими словами, Томсон доказал, что **электрический заряд дискретен, что всякое заряженное тело несёт на себе заряд кратный заряду электрона.**

Следующим исследователем, решившим непростую задачу непосредственного измерения заряда электрона, был Роберт Милликен, американский исследователь, которого часто называли чародей физической лаборатории. И было за что. Этому человеку удалось достаточно простым способом поставить многочисленные споры по поводу элементарного электрического заряда.



Рис. 1.41. Роберт Милликен

Роберт Эндрюс Милликен (1868 – 1953 гг.) родился 22 марта в семье священника, проживавшей в г. Моррисоне, что в штате Иллинойс. После традиционной американской школы Роберт поступил в Оберлин-колледж (шт. Огайо), где настолько преуспел в изучении физики, что стал, будучи на втором курсе, приглашаться в качестве преподавателя в средние школы.

Закончив 1891 г. с отличием колледж Милликен продолжил образование в Колумбийском университете, где так же проявил свои уникальные способности в физике и математике.

В 1896 г. Милликен встретился со знаменитым американским физиком Майкельсоном, которому поведал о своих творческих планах перед стажировкой в Германии в Гёттингенском университете.

На втором году стажировки Милликен получил приглашение от Майкельсона занять место ассистента кафедры физики Чикагского университета. Денег на возвращение в Америку не было, пришлось отдать в залог все, имеющиеся в наличии вещи. В университете Милликен занялся созданием учебников по физике, удовлетворяющих современным требованиям. Активной научной деятельностью Милликен занялся только в 40 лет.

Милликен начал в 1906 разработал «метод капель», который позволил измерить заряд отдельного электрона. Метод состоял в наблюдении за поведением

мельчайших заряженных капелек воды в мощном электрическом поле и выявлении тех из них, заряд и масса которых находились в идеальном равновесии. В основу гениального эксперимента был положен простой и хорошо известный факт электризации тел при трении.

Подобно стеклянной палочке, натёртой шерстью, электрический заряд приобретают капельки масла при получении их с помощью пульверизатора. Милликен направил заряженные капли масла между обкладками простого конденсатора и стал наблюдать за их падением в микроскоп, одновременно увеличивая разность потенциалов между обкладками.

При некоторой разности потенциалов падение капель прекращалось, капли переходили в состояние равновесия. Сила тяжести уравнивалась силой, обусловленной взаимодействием заряда капли с электрическим полем между обкладками конденсатора и силой сопротивления со стороны воздуха. Получалось достаточно простое уравнение

$$QE - \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_M = \gamma v,$$

где Q – заряд капли масла, E – напряжённость электрического поля, R – радиус капли, ρ_M – плотность масла, γ – коэффициент сопротивления со стороны воздуха, v – скорость падения капли.

Далее Милликен в пространство между обкладками направил рентгеновские лучи, которые электрически нейтральные молекулы воздуха превращали в ионы, заряженные частицы. Как только включалась рентгеновская трубка, капельки масла резко меняли скорость.

Из этого следовало, что к каплям «прилипали» ионы из воздуха. Оказалось, что вычисляемые по уравнению новые заряды капель при любом времени облучения кратны одной и той же величине, которая была найдена в опытах при электролизе жидкостей. Заряд капель был кратен величине $\cong 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Тем самым была экспериментально доказана дискретность электрического заряда и впервые точно измерена его величина.

Научно обоснованную формулировку этого закона впервые в 1843 г. сделал Джеймс Клерк Максвелл (1831 – 1879 гг.). Закон был открыт на основе многочисленных экспериментальных фактов. Правда, в своих, несомненно, гениальных рассуждениях Максвелл (рис. 1.42) использовал понятие «электрической силы», об электрических зарядах в то время только строили догадки. Это сегодня известно, что электрический заряд, подобно массе, является одним из фундаментальных свойств материи.

Одно время даже считалось, что носителем элементарного, самого маленького в природе заряда, должна являться самая маленькая по массе частица. Всё сходилось на электроны.

Самый маленький по массе и самый маленький по значению электрического заряда. Однако видимая логичность такого предположения была рассеяна после измерения заряда протона, который оказался по модулю с высокой степенью точности совпадающим с модулем заряда электрона. Так сказать, положительный антипод отрицательно заряженного электрона.



Рис. 1.42. Джеймс Клерк Максвелл

Но вся интрига состояла в том, что протон оказался примерно в 1650 раз массивнее электрона. Корреляция между зарядом и массой явно не прослеживалась.

Вместе с тем, все без исключения частицы, из которых состоит материя во Вселенной, несут тот или иной электрический заряд. Электроны – отрицательный, протоны – положительный, а вот нейтроны, входящие в состав ядер имеют нулевой заряд.

Физиками обнаружено, что некоторые системы при определённых обстоятельствах обладают неизменными свойствами. Такие системы называются консервативными, в них выполняются законы сохранения. Всякий закон сохранения, по сути, сводится к утверждению, что в отсутствии источников и стоков в системе её параметры неизменны во времени.

Электрический заряд тоже относится к категории консервативных характеристик замкнутых систем, не испытывающих влияния извне. Дело в том, что для замкнутых систем алгебраическая сумма их электрических зарядов остаётся неизменной.

Так, например, если взять некоторое фиксированное количество воды, обычной H_2O , и определить суммарный электрический заряд всех структурных элементов, то он не будет изменяться при механических, физических, химических процессах.

Закон сохранения заряда является одним из фундаментальных законов природы. Невыполнение этого закона не зафиксировано в известных процессах, происходящих в природе или воспроизводимых человеком. Закон сохранения заряда являет собой принцип несотворимости и неуничтожимости движущейся материи. Формулировка закона проста и лаконична: **Алгебраическая сумма электрических зарядов любой электрически изолированной системы остаётся неизменной, при протекании любых процессов внутри этой системы**

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} q_i = \text{const},$$

где Q – полный электрический заряд системы тел или частиц, q_i – электрический заряд i – той части системы, n – число частей системы.

Этот закон, наряду с законами сохранения импульса и энергии, составляет теоретическую основу анализа широкого круга разнообразных процессов, как на макро уровне, так и на микро уровнях. В частности, закон сохранения заряда успешно использовался при анализе результатов атомных и ядерных реакций.

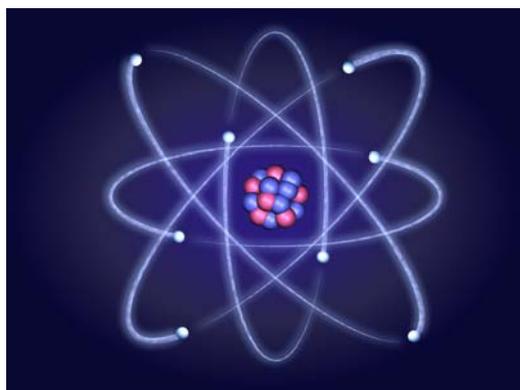


Рис. 1.43. Планетарная модель атома Резерфорда

По современным представлениям, в упрощённом варианте Резерфорда, атом представляет собой планетарную конструкцию (рис. 1.43), состоящую из положительно заряженного ядра и электронных оболочек, причём в невозбуждённом состоянии баланс положительного и отрицательного электричества выполняется с высокой степенью точности, делая атом электрически нейтральным. При внешних воздействиях атомы могут терять или присоединять к себе электроны, превращаясь в ионы.

В твёрдых телах, где связи между упорядоченно расположенными в пространстве ионами сильны, имеется некоторое число свободных электронов, способных перемещаться в пределах тела, или даже покидать его.

Так, например, натирая пластмассовую линейку кусочком кожи, осуществляют её электризацию путём переноса за счёт трения электронов с кожи на линейку. Положительный заряд кожи, при этом, в точности равен отрицательному заряду линейки.

Электрический заряд не может удерживаться телом бесконечно долго, он «стекает» на, присутствующие в воздухе капельки воды, которые обладают свойством поляризоваться за счёт энергии заряженных тел.

С точки зрения наличия свободных носителей заряда, электронов и ионов, все вещества условно поделены на три категории, которые количественно характеризуются удельным сопротивлением ρ :

- Проводники $\rho \cong 10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м ;
- Полупроводники $\rho \cong 10^{-6} - 10^{-3}$ Ом·м;
- Диэлектрики $\rho \cong 10^3 - 10^{16}$ Ом·м.

Следует отметить, что некоторые вещества относятся сразу к двум типам веществ, в зависимости от внешних условий. Во-первых, все полупроводники имеют свойство быть и проводниками и диэлектриками. Например, кремний, германий, селен и др. в обычных условиях обладают электронной проводимостью, но весьма чувствительны к нагреванию, облучению, бомбардировке заряженными частицами.

Первые количественные характеристики взаимодействия между заряженными телами были получены Шарлем Огюстэном Кулоном (рис. 1.44). Кулон (1736 – 1806 гг.) будучи военным инженером, занимался многими научными задачами, связанными со статикой сооружений, теорией и практикой ветряных мельниц, механикой закрученных нитей, теорией трения скольжения и качения, теорией электрических явлений.

Кулон изобрёл крутильные весы, с помощью которых провёл эксперименты по взаимодействию точечных электрических зарядов. Результаты этих опытов позволили ему сформулировать основополагающий закон электростатики, который сейчас носит его имя.

Следует отметить, что закон взаимодействия заряженных тел произвольных размеров сформулировать затруднительно, потому что сила взаимодействия зависит от геометрических особенностей тел и от особенностей их взаимного расположения.

Кулон совершенно обоснованно предположил, что эти обстоятельства существенно уменьшат своё влияние на результат, если размерами заряженных тел по сравнению с расстоянием между ними можно пренебречь.

Другими словами, Кулон ввёл в рассмотрение понятие точечного заряда и провёл серию экспериментов по определению силы взаимодействия между ними, используя построенные специально для этого случая крутильные весы, схема которых показана на рис. 1.45.

Внутри стеклянного цилиндра, предохраняющего установку от влияния перемещения воздуха, помещалось лёгкое диэлектрическое коромысло, на котором закреплялись два идентичных по размерам и массе шарика.



Рис. 1.44. Шарль Огюстэн Кулон

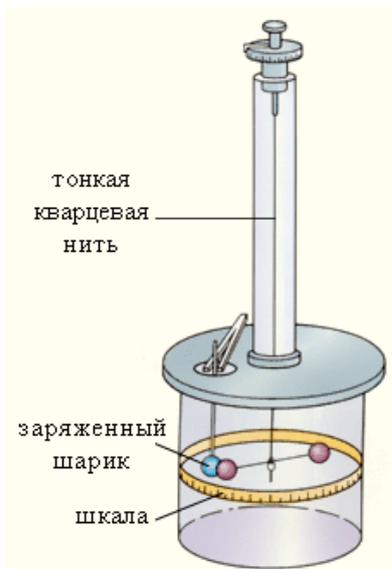


Рис. 1.45. Установка Кулона

Коромысло подвешивалось на кварцевой нити, которая в установке Кулона выполняла функции измерительного упругого элемента. Внутри установки вносился третий шарик, которому мог сообщаться электрический заряд.

При взаимодействии одноимённо заряженных шариков тонкая кварцевая нить закручивалась, причём угол её закручивания определялся моментом действующей силы, т.е. произведением модуля силы электростатического взаимодействия на плечо (половина длины коромысла).

Поскольку угол закручивания линейно зависел от момента действующей силы, величина последней вычислялась. Кулон на основании своих экспериментов пришёл к выводу о том, что сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена по линии, соединяющей эти заряды и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r

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

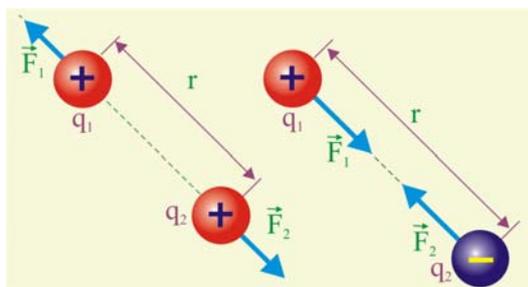


Рис. 1.46. Взаимодействие точечных зарядов

Если двум одинаковым шарикам сообщить им заряды q_1 и q_2 , то, как экспериментально выяснил Кулон, силы взаимодействия и величины этих зарядов будут определяться пропорцией

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{F_1}{F_2},$$

при этом разноимённые заряды будут притягиваться (рис. 1.46), а одноимённые – отталкиваться.

В 1785 г. Кулон сформулировал закон взаимодействия точечных зарядов:

Сила взаимодействия F двух точечных зарядов в вакууме или сухом воздухе направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды, пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между взаимодействующими зарядами

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}^2},$$

где k – численный размерный коэффициент, величина которого зависит от системы выбранных единиц, так, например в системе СИ

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cong 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

здесь, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, характеризующая ослабления электрического поля вследствие рассеяние энергии в структурных элементах среды, $\epsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$ – электрическая постоянная, которая не имеет физического смысла и предназначена для совмещения электрических единиц с основными единицами интернациональной системы.

Таким образом, закон Кулона для вакуума или сухого воздуха в системе СИ представится в векторной форме следующим образом

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r_{1,2}^3} \vec{r}_{1,2}.$$

С учётом величины размерного коэффициента k можно видеть, что Кулон огромная величина, для использования на практике не удобная. Например, два заряда по 1 Кл каждый, расположенные в воздухе ($\epsilon \cong 1$) на расстоянии 100 м друг от друга, будут взаимодействовать друг с другом с силой

$$F \cong 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 1}{100^2} \cong 9 \cdot 10^5 \text{ Н},$$

что соответствует силе, с которой давит на землю тело массой около 90 тонн.

И ещё один пример, интимного характера. Предположим, что удалось одну миллиардную часть электронов с тела молодого человека перенести на тело девушки. Оценим, с какой силой «заряженные» молодые люди будут притягиваться друг к другу. Для решения нам потребуются некоторые величины. Примем массу молодых людей за $m_1 = m_2 = 70$ кг, которая складывается, в основном, из суммы масс всех протонов и нейтронов $m_p \cong 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, электроны примерно на три порядка легче.

Оценим общее число протонов и нейтронов

$$N = \frac{m}{m_p} \cong 4,2 \cdot 10^{28}.$$

Число протонов будет примерно в два раза меньше, т.е. $N_p \cong 2,1 \cdot 10^{28}$. Модуль заряда тел определится в виде

$$|Q_1| = |Q_2| = 10^{-9} \cdot N_p \cdot |e| \cong 3,36 \text{ Кл}.$$

Воспользовавшись законом Кулона, оценим силу «влечения» друг к другу противоположно заряженных молодых людей

$$F \cong 9 \cdot 10^9 \frac{(3,36)^2}{100} \cong 1 \cdot 10^9 \text{ Н}.$$

Поистине фантастическое значение, оно эквивалентно весу массы 100 000 тонн!

Закон Кулона по форме записи совпадает с законом гравитации Ньютона, действительно

$$F_{\text{гп}} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2};$$

Принципиальное сходство заключается в том, что обе силы обратно пропорциональны квадрату расстояния между взаимодействующими телами. **Электрические силы, так же как и гравитационные являются консервативными, их работа не зависит от вида траектории, а определяется только начальным и конечным положением.**

Отличие же заключается в порядке величин сил и в том, что силы электрического происхождения могут быть как притягивающие, так и отталкивающие, а гравитационные силы только притягивающие.

Сравним величины этих сил на примере атома водорода, состоящего, как известно, из одного протона и одного электрона

$$F_k = k \frac{|e|^2}{r^2}; \quad F_{\text{гп}} = G \frac{m_e \cdot m_p}{r^2};$$

$$\frac{F_k}{F_{гp}} = \frac{e^2 k}{G \cdot m_e \cdot m_p} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9 \cdot 10^9}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-30} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} \cong 2 \cdot 10^{39};$$

Таким образом, при прочих равных условиях, силы электрического происхождения на атомном уровне существенно превосходят гравитационные.

Гравитационные силы наиболее ярко проявляются на уровне макро и мега мира, особенно при взаимодействии тел с космическими масштабами. Электрические силы превалируют в микромире, мире очень малых масс и расстояний.

Как только обнаружилось, что заряженные тела могут воздействовать на другие без непосредственного контакта, сразу возник законный вопрос. Как? Каков механизм передачи силового воздействия? Что является причиной возникновения механических сил?

Ведь в своих опытах Кулон посредством крутильных весов регистрировал именно механический момент хорошо изученных Ньютоновских сил. Одновременно возникли две гипотезы.

В соответствии с **гипотезой дальнего действия**, телам приписывалось свойство действовать на другие тела на расстоянии, причём, предполагалось, что это действие передаётся мгновенно и без посредничества каких-либо третьих сред. Согласно этой гипотезе, заряженное тело никаких изменений в окружающем пространстве не производит.

Гипотеза ближнего действия предполагала наличие между телами некой субстанции порождаемой электрическими зарядами и обеспечивающей силовые воздействия на другие тела и заряды.

Рассуждения сторонников **теории ближнего действия** строились на механических аналогиях. Уже достаточно полно были исследованы свойства упругих волн, для распространения которых непременно нужна была среда.

Упругие волны тоже обладают энергией и могут воздействовать на тела, расположенные на значительном расстоянии от источника колебаний. Было логично, в этой связи, предположить, что электрическое действие передаётся с конечной скоростью и на конечные расстояния. Из таких рассуждений следовало, что всякое заряженное тело в отсутствие остальных должно изменять свойства окружающего его пространства.

Современная официальная наука исповедует только идею ближнего действия, в соответствии с которой вокруг электрических зарядов пространство заполнено особой субстанцией, неким физическим агентом, в котором проявляются механические силы, вызванные взаимодействием этого агента и вносимых в него тел или зарядов. Такая субстанция получила название – **электрическое поле**. Появление в некой точке пространства электрического заряда сопровождается возникновением электрического поля.

Движущиеся заряды генерируют электромагнитное поле, т.е. комбинацию электрической и магнитной составляющей. Как выяснилось при исследовании электромагнитных полей, они заключают в себе и переносят энергию подобно упругим волнам.

Электромагнитные поля, таким образом, представляют собой абстрактное понятие, предназначенное для объяснения электрических и магнитных взаимодействий. **Электромагнитные поля, являющиеся объективной материальной реальностью, представляются в виде особой формы материи обладающей определённым набором физических свойств и характеристик.**

Количественно электрическое поле заряда q можно охарактеризовать, внося в него другой пробный заряд q_0 и измеряя силу взаимодействия F в разных точках

пространства. Сила этого взаимодействия, следуя закону Кулона, будет пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

$$\vec{F} = k \frac{|q_1||q_0|}{r^3} \vec{r}.$$

Такая характеристика электрического поля не будет универсальной, потому, что сила Кулона в каждой точке пространства наряду с исходным зарядом будет зависеть от величины пробного заряда q_0 . От такого неудобства можно избавиться, если в качестве характеристики поля рассматривать не величину силы, а отношение этой силы к пробному заряду

$$\frac{\vec{F}}{|q_0|} \equiv \vec{E} = k \frac{|q_1|}{r^3} \vec{r}.$$

Векторная величина \vec{E} называется напряжённостью электрического поля. Для изолированного точечного заряда, расположенного в вакууме или сухом воздухе, напряжённость электрического поля определяется непосредственно из уравнения закона Кулона

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^3} \vec{r}.$$

Как следует из уравнения, если поле создано положительным зарядом (напомним, что это понятие условное, принятое по общему соглашению), то вектор напряжённости электрического поля направлен от заряда во внешнее пространство по радиус-вектору, соединяющему заряд и данную точку пространства (рис. 1.47). В случае отрицательного заряда вектор напряжённости так же направлен по радиус-вектору, но из данной точки в сторону заряда.

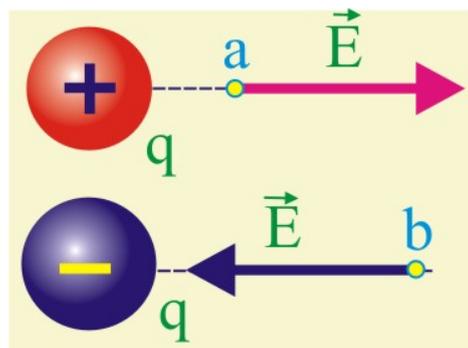


Рис. 1.47. Направление напряжённости электрического поля

Таким образом, если известна напряжённость электрического поля в какой-либо точке пространства, окружающего изолированный заряд, то можно однозначно определить величину и направление силы Кулона, которая возникнет при помещении в эту точку заряда q .

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Пусть электрическое поле создаётся двумя разноимёнными точечными зарядами q_1 и q_2 с напряженностями, \vec{E}_1 и \vec{E}_2 . Результирующее поле может быть найдено по правилам сложения векторов, т.е. путём геометрического сложения (рис. 1.48)

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Модуль результирующего вектора определится в этом случае как

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\vec{E}_1; \vec{E}_2)}.$$

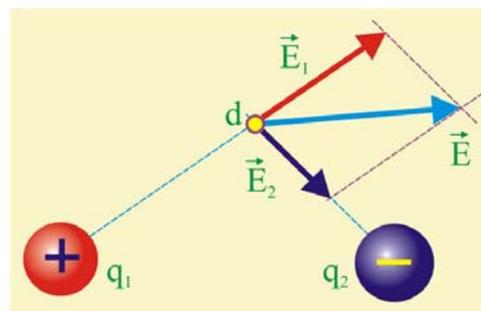


Рис. 1.48. Сложение электрических полей

Правило векторного сложения электрических полей справедливо для производного числа зарядов. Если имеется ансамбль зарядов $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, создающих

электрические поля с напряжённостями $\{\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n\}$, то вектор напряжённости результирующего поля \vec{E} в некоторой точке общего пространства определится уравнением

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

Уравнение выражает, так называемый, **принцип суперпозиции (наложения)** электрических полей. Следует отметить, что принцип суперпозиции выполняется, строго говоря, не всегда.

Так, например, на микроуровне, когда расстояния между зарядами сокращаются до величин порядка 10^{-15} м, этот принцип не выполняется. Вместе с тем на макрорасстояниях этот принцип является достаточно мощным и универсальным инструментом при исследовании электрических полей.

Как отмечалось выше, в качестве точечного заряда можно принимать и заряженные тела, в том случае если их геометрические размеры существенно меньше расстояний, на которых предполагается оценивать электрическое поле. При необходимости вычисления напряжённости поля от произвольного числа источников в заданной точке вычисляется напряжённость от каждого заряженного тела, рассматриваемого как точечный заряд, а затем в соответствии с принципом суперпозиции находится суммарная напряжённость.

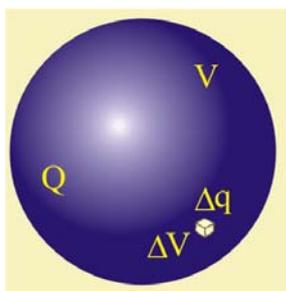


Рис. 1.49. Объёмная плотность заряда

На практике часто встречаются случаи, когда заряженное тело настолько велико, что использование модели точечного заряда не представляется возможным, в этом случае для определения параметров поля необходимо знать распределение зарядов внутри тела, т.е. по его объёму.

В этом случае поступают по аналогии с определением плотности тела, весь объём тела V разбивается на большое количество элементарных объёмов ΔV , заряд которых будет Δq . В этом случае заряженность тела можно охарактеризовать объёмной плотностью заряда

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}, [\text{Кл}/\text{м}^3].$$

Заряд, находящийся в элементе объёма dV определится в виде произведения $dq = \rho dV$.

Для целого класса веществ, например, для проводников, характерно присутствие электрических зарядов только в достаточно тонком поверхностном слое. В этом случае характерной величиной при анализе полей будет поверхностная плотность зарядов, которая определится как

$$\delta = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS}, \left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right].$$

Проводники, длина которых существенно больше их прочих размеров удобно характеризовать линейной плотностью заряда

$$\tau = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta L} = \frac{dq}{dL}, \left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right].$$

1.3. Напряжённость электрического поля

Как и всякое векторное поле, электрическое поле может быть задано путём изображения вектора напряжённости в необходимых точках в окрестностях заряда.

Поле можно представить и аналитически, задав для каждой точки уравнение напряжённости, например в координатной форме.

Другой графический способ изображения поля, обладающий наглядностью, может быть реализован при изображении линий напряжённости электрических полей (рис. 1.50).

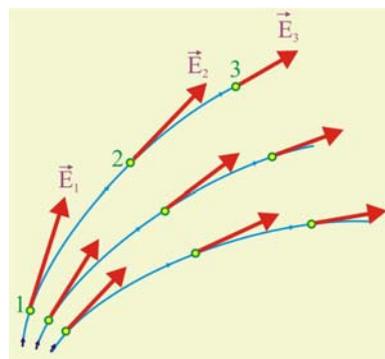


Рис. 1.50. Линии напряжённости

Линиями напряжённости электрического поля называются линии, касательные к которым совпадают по направлению с векторами напряжённости в соответствующих точках поля.

Линиям напряжённости сообщается направление в соответствии с направлением вектора напряженности в данной точке. Как следует из определения, линии напряжённости нигде не пересекаются, они начинаются или заканчиваются на телах, несущих на себе электрический заряд.

В качестве примера на рис. 1.51 приведены линии напряжённости электрического поля разноимённых точечных зарядов. Линии напряжённости электрического поля на положительных зарядах начинаются, а на отрицательных – заканчиваются.

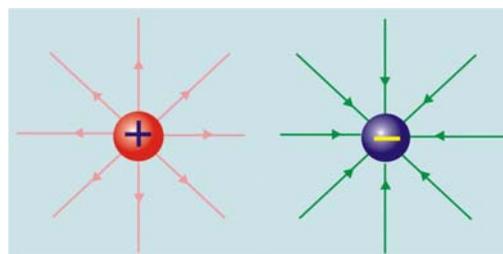


Рис. 1.51. Линии напряжённости точечных зарядов

На рис. 1.44 показана картина электрического поля возникающего от двух разноимённо заряженных одинаковых по модулю зарядов.

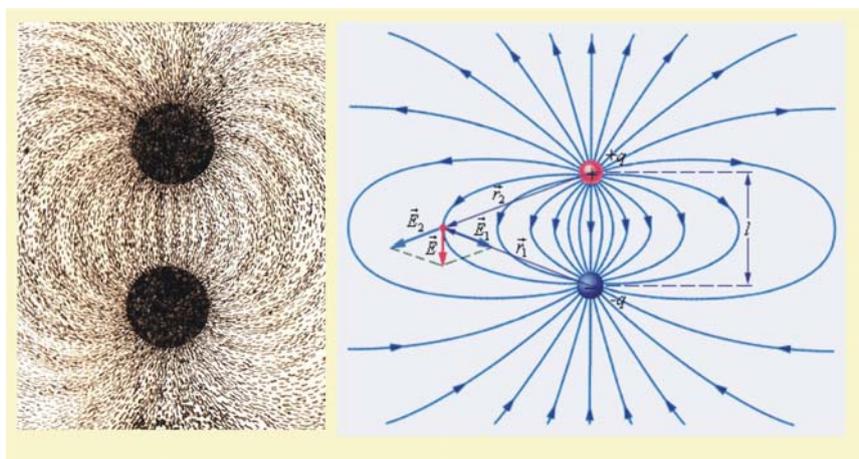


Рис. 1.52. Электрическое поле диполя

Такая система зарядов называется **электрическим диполем**. Левая часть рисунка получена путём визуализации электрического поля двух разноимённо заряженных шариков в отсутствие вблизи других зарядов и тел. Правая часть рисунка представляет собой результат построения картины поля по вышеизложенным правилам, с использованием принципа суперпозиции.

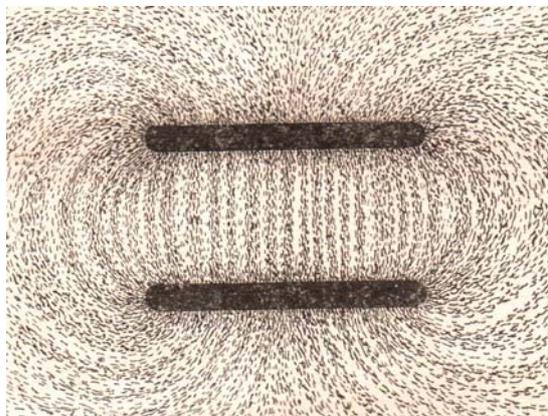


Рис. 1.53. Поле конденсатора

Визуализация электрического поля, создаваемого плоским воздушным конденсатором, представляющим собой две параллельные пластины с размерами, превосходящими расстояние между ними и расположенные в простейшем случае в воздухе, показана на рис. 1.53.

Картина линий напряжённости показывает, что пластины заряжены разноимённо, т.е. линии напряжённости начинаются на положительной пластине и заканчиваются на пластине, заряженной отрицательно.

Внутри конденсатора поле является однородным (линии напряжённости параллельны друг другу). По периферии обкладок конденсатора за счёт краевых эффектов поле искажается и перестаёт быть линейным.

Если бы внутри конденсатора линии напряжённости не были бы перпендикулярны поверхности пластин, то возникла бы составляющая вектора \vec{E} , направленная вдоль пластины, что должно было бы привести к появлению составляющей силы Кулона, параллельной поверхности пластин.

В этом случае электрические заряды пришли бы в движение, равновесие зарядов должно было бы нарушиться. Поскольку такового не наблюдается, то линии напряжённости внутри конденсатора параллельны друг другу и перпендикулярны поверхности пластин.

Анализ электрических полей может быть упрощён при использовании специальной теоремы Остроградского – Гаусса. Математическая формулировка теоремы впервые была получена Михаилом Васильевичем Остроградским (1801 – 1862 гг.) академиком Петербургской Академии Наук, и адаптирована к электрическим полям немецким учёным Карлом Фридрихом Гауссом (1777 – 1855 гг.).

Для формулировки теоремы в системе единиц СИ необходимо ввести новую векторную величину – **электрическое смещение**, которая определяется следующим соотношением

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}.$$

Электрическое смещение в вакууме или сухом воздухе равно произведению электрической постоянной ϵ_0 на вектор напряжённости электрического поля в точке пространства.

Вектор электрического смещения по направлению совпадает с направлением вектора напряжённости и для точечного заряда, расположенного в вакууме или воздухе модуль смещения определится уравнением

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}.$$

Векторное поле электрического смещения удобно характеризовать потоком. Для определения потока выделим в пространстве, занятом электрическим полем

плоскую поверхность площадью S , построим внешнюю к ней нормаль \vec{n} (рис.1.54).

Поток вектора электрического смещения в этом случае определится традиционным уравнением

$$\Phi_D = DS \cos(\vec{D}; \vec{n}) = SD_n,$$

где D_n – проекция вектора смещения на внешнюю нормаль. Густота линий электрического смещения численно равна модулю D . В случае неоднородного поля поток смещения вычисляется путём интегрирования по поверхности S

$$\Phi_D = \int_S D_n dS.$$

Анализируя уравнение можно отметить, что поток смещения может быть при прочих равных условиях положительным, отрицательным и нулевым, в зависимости от значения $\cos(\vec{D}; \vec{n})$.

В случае $\cos(\vec{D}; \vec{n}) < \pi/2$ поток будет положительным, при $\cos(\vec{D}; \vec{n}) = \pi/2$ поток будет нулевым, т.к. линии смещения не будут пересекать выделенную площадку.

Поместим положительный точечный заряд q в центр виртуальной сферической области площадью S и определим величину потока смещения через поверхность этой сферы радиусом R с учётом того, что во всех точках пересечения линий смещения они будут совпадать с направлением внешней нормали, т.е. $\cos(\vec{D}; \vec{n}) = 1$ (рис. 1.55)

$$\Phi_D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{R^2} 4\pi R^2 = q.$$

Поскольку из уравнения потока исчез радиус сферы, то уравнение можно распространить на любую концентрическую сферу, охватывающую заряд q , например, на сферу S_1 и произвольную замкнутую поверхность S_2 .

Если замкнутая поверхность не охватывает заряд, как S_3 , то поток через неё будет равен нулю, потому что число линий смещения, входящих в поверхность S_3 будет при любой величине заряда равно числу выходящих линий, причём для входящих линий поток будет отрицательным, а для выходящих – положительным, что и обеспечивает нулевой поток через эту не охватывающую заряд поверхность.

Математическое выражение теоремы Остроградского – Гаусса, на основании проведенного выше рассмотрения можно представить в общем виде следующим образом

$$\Phi_D = \int_S D_n dS = q.$$

Поток электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме всех зарядов, располагающихся внутри поверхности.

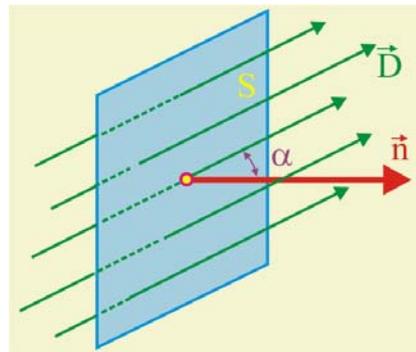


Рис. 1.54. Поток электрического смещения

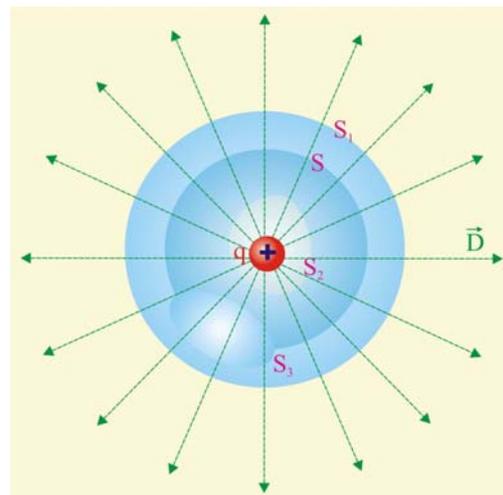


Рис.1.55. Теорема Остроградского – Гаусса

1.4. Энергетические характеристики электрических полей

Поскольку в электрических полях проявляется действие особого рода сил, то по всем законам классической механики, которую в электрических полях никто, кстати, не отменял, эти поля способны производить работу. Обсудим некоторые эффекты, возникающие при перемещении зарядов в электрических полях.

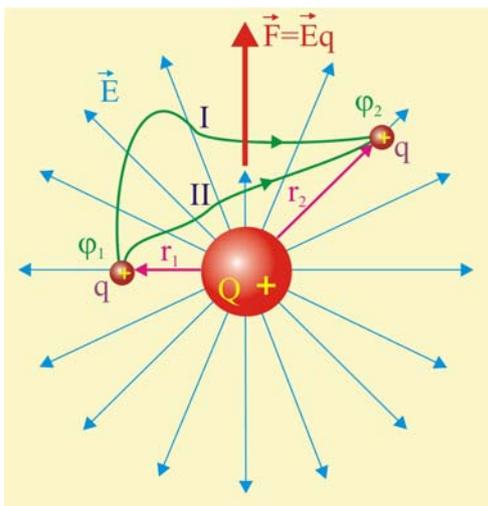


Рис. 1.56. Работа при перемещении заряда

Рассмотрим неподвижный точечный заряд Q , расположенный в воздухе и создающий в окружающем пространстве электрическое поле напряжённостью

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

В поле перемещается пробный заряд q из начального положения 1 в конечное положение 2 вдоль произвольной криволинейной траектории, например I (рис. 1.56). Модуль силы Кулона, возникающей при взаимодействии зарядов, запишется следующим образом

$$F_k = Eq = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}.$$

Найдём далее элементарную работу, совершаемую силой Кулона на элементарном перемещении заряда $d\vec{r}$

$$\delta A = \vec{F}_k \cdot d\vec{r}.$$

Как видно из уравнения элементарная работа при перемещении точечного заряда в электрическом поле представляется скалярным произведением двух векторных величин, т.е. величина и знак работы зависит, как и в механике, от взаимного направления \vec{F}_k и $d\vec{r}$. Работа на конечном перемещении определится в виде интеграла

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{qQ\vec{r}}{r^3} d\vec{r} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}.$$

Интеграл работы в общем случае зависит от положения начальной и конечной точек, а так же от формы траектории, по которой перемещается заряд q .

Однако для электрических полей неподвижных зарядов работа не зависит от формы траектории. В этом легко убедиться, если из конечной точки 2 вернуть заряд в точку 1 по траектории, отличной от первоначальной.

При перемещении заряда по любой замкнутой траектории, когда $\vec{r}_1 = \vec{r}_2$ итоговая работа будет равна нулю, т.е. алгебраическая сумма работ, совершённых электрическими силами на замкнутом пути будет равна нулю

$$A_{1 \rightarrow 2} + A_{2 \rightarrow 1} = A_{1 \rightarrow 2} - A_{2 \rightarrow 1}.$$

Уравнение даёт основание выражение для работы переписать так

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Электрическое поле неподвижных зарядов, таким образом, как и гравитационное поле, обладает **свойством потенциальности**, т.е. работа, производимая такими полями, не зависит от вида траектории, а определяется только положениями начальной и конечной точек перемещения.

Свойство потенциальности обусловлено тем обстоятельством, что в электростатических полях проявляются консервативные силы, дающие возможность каждой точке поля охарактеризовать с энергетических позиций. Действительно, совершаемая работа должна соответствовать определённому изменению энергии перемещаемого заряда. Подобное наблюдается в механике и определяется теоремой об изменении кинетической энергии

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = K_2 - K_1.$$

Работа, совершаемая в электростатическом поле, совершается за счёт уменьшения потенциальной энергии движущегося заряда

$$A_{1 \rightarrow 2} = \Pi_2 - \Pi_1, \quad \delta A = -d\Pi.$$

Как и в механике, абсолютное значение потенциальной энергии не обладает значимым физическим смыслом, более актуальным является изменение энергии, в связи, с чем необходимо представлять, что при бесконечном удалении зарядов друг от друга потенциальная энергия их взаимодействия будет стремиться к нулю

$$A_{1 \rightarrow \infty} = \Pi_2 - \Pi_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{r_1} \right) = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1} = \Pi_1.$$

Проведенные выше рассуждения показывают, что работа, совершаемая электрическими силами, действующими на электрические заряды, пропорциональна его величине.

Влияние поля на заряд, кроме того, пропорционально разности потенциальных энергий, измеряемой совершенной работой. Это означает, что отношение потенциальной энергии к величине заряда будет характерной величиной для каждой точки пространства, занятого электрическим полем. Таким образом, отношение потенциальной энергии к величине заряда можно использовать как энергетическую характеристику поля, как его способность совершать работу

$$\varphi = \frac{\Pi}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}.$$

В общем случае потенциал электрического поля в данной точке определяется уравнением

$$\varphi = \frac{\Pi}{q_2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Сравнение уравнений позволяет прийти к важному выводу: при перемещении заряда из одной точки поля в другую будет производиться работа только в том случае, если потенциалы этих точек не одинаковы, если $\varphi_1 \neq \varphi_2$.

В системе СИ единицей потенциала является вольт

$$[\varphi] = \frac{[\Pi]}{[q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

При решении некоторых задач электростатики использование потенциала даёт ряд преимуществ по сравнению с напряжённостью. Для задания потенциала данной точки поля требуется всего одна величина, вместо трёх проекций вектора напряжённости, кроме того, величина разности потенциалов может быть достаточно просто измерена опытным путём.

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью** или поверхностью равного потенциала.

Силовые линии электрического поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. На рис. 1.59. приведены эквипотенциальные поверхности точечного заряда, системы двух разноимённых зарядов и системы двух одноимённых зарядов. Эквипотенциали представлены замкнутыми линиями, окружающими заряды, в то время как линии напряжённости электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах.

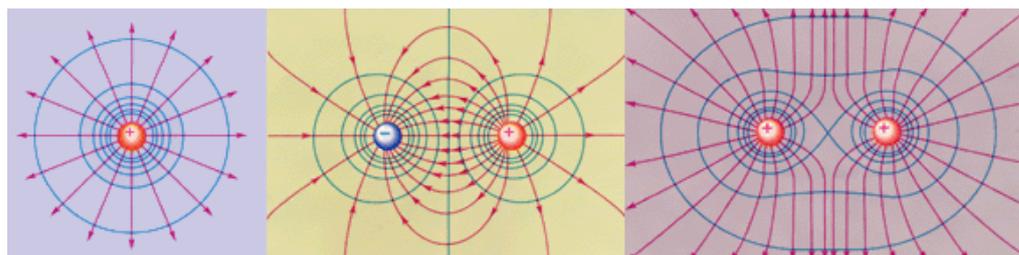


Рис. 1.57. Эквипотенциальные поверхности

Приведём далее уравнения потенциалов некоторых простых источников электрических полей:

Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

где $\varphi(r \rightarrow \infty) = 0$, r – расстояние от заряда q до точки определения потенциала.

Потенциал поля шара

Если заряд Q равномерно распределён по поверхности шара радиусом R , то вне шара при ($r > R$) на расстоянии r потенциал создаваемого шаром поля определится уравнением

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Потенциал плоского конденсатора

Плоский конденсатор представляет собой две проводящие пластины, заряженные разноимённо и расположенные на расстоянии d друг от друга. Напряжённость поля между пластинами определяется уравнением

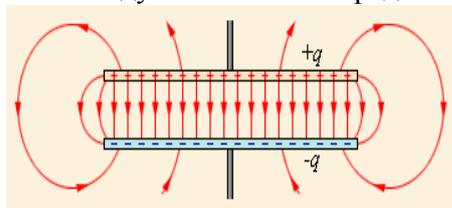


Рис. 1.58. Плоский конденсатор

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0},$$

где σ – поверхностная плотность электрического заряда на пластинах. Разность потенциалов в этом случае определится как

$$U = \int_0^x E dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \int_0^x dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0} x.$$

Разность потенциалов между пластинами определится как $U_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d$, в этом случае

$$U = U_0 \frac{x}{d}.$$

1.5. Накопители электрической энергии

Если изолированному проводнику сообщить электрический заряд, то его потенциал будет прямо пропорционален этому заряду. Увеличение заряда проводника сопровождается пропорциональным изменением напряжённости электрического поля. Математически такую закономерность изменения потенциала в зависимости можно выразить простым уравнением

$$Q = C\varphi,$$

где Q – заряд проводника, φ – потенциал проводника, C – коэффициент пропорциональности, именуемый электрической ёмкостью, или сокращённо – ёмкостью

$$C = \frac{Q}{\varphi}, \quad [C] = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = 1\text{Фарад}.$$

Потенциал шара радиуса R , несущего электрический заряд Q , определяется уравнением

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_R^{\infty} \frac{Q}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}.$$

С учётом значения потенциала, величина электрической ёмкости уединенного шара запишется следующим образом:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R.$$

Определим в этой связи электрическую ёмкость Земли, приняв её за шар, радиусом $R \cong 6,4 \cdot 10^5$ м, диэлектрическую проницаемость примем равной $\epsilon = 1$

$$C_3 \cong 12,56 \cdot 9 \cdot 10^{-12} \cdot 6,4 \cdot 10^5 \cong 7,23 \cdot 10^{-5} \text{Ф}.$$

Чтобы шар имел ёмкость 1 Ф, его радиус должен быть в $k \cong 1,38 \cdot 10^4$ раз больше радиуса Земли, что свидетельствует о значительности единицы ёмкости. На практике чаще всего используются дольные единицы: пикофарады (1 пФ = 10^{-12} Ф), нанофарады (1 нФ = 10^{-9} Ф), микрофарады (1 мкФ = 10^{-6} Ф).

Изолированные уединённые проводники обладают относительно малой ёмкостью, даже шар размеров нашей планеты обладает электрической ёмкостью порядка 723 мкФ.

В ряде достаточно простых устройств можно получить большие возможности «консервации» электрических зарядов. Идея конструкций основана на том, что электроёмкость уединённого проводника увеличивается при приближении к нему других тел. Устройства для накопления зарядов называются **конденсаторами**.

История изобретения первого накопителя электрических зарядов начинается в XVIII веке, когда электрическими опытами занимались практически все образованные люди, включая настоятелей соборов. Яркий представитель монашеского ордена иезуитов Эвальд Георг фон Клейст в свободное от основной службы время, в тайне от прихожан у себя дома ставил электрические опыты.

В распоряжении Клейста была простейшая электрофорная машина в виде гуттаперчевого шара с вращающейся поверхности которого можно было снимать достаточно слабенький электрический заряд.

Как отмечалось во введении, опыты с получением воды, содержащей ионы серебра, привели к открытию лейденской банки – первого накопителя электрического заряда. По известным причинам результаты своих экспериментов с электриче-

ством Клейст не публиковал. Хотя в XVIII в. на кострах уже не жгли, но сана за научные шалости можно было лишиться легко.

Несмотря на опасения, Клейст всё-таки решился обнародовать своё открытие. Нет, свои результаты он отправил не в научное издание, а, как и положено, по инстанциям. Подробнейший отчёт о своих экспериментах он отправил в г. Данциг протодиакону. Физиком протодиакон сам не «баловался», но в его близких приятелях хаживал бургомистр Даниэль Гралат, который ко всему прочему возглавлял городское общество естествоиспытателей.

Просвещенные в высшей степени были в то время бургомистры. Научное общество, возглавляемое этим чиновником как раз искало тему актуального приложения своих усилий, поэтому информация фон Клейста пришлась кстати.

Изготовив батарею из банок, заполненных водой, Гралат провёл апробацию устройства на активистах общества. Лупило не слабо.

Далее опытами заинтересовались преподаватели Лейденского университета. Эффективность накопления заряда проверялась исключительно по силе разрядов в конечности энтузиастов.

Эффектами, производимыми лейденскими банками, так их стали называть в простонародии, заинтересовался аббат Ноле. Составив приличную батарею, он пригласил для опытов 180 доблестных мушкетёров, Франция как никак. Мушкетёры, держась за руки, с громкими криками испытывали на себе действие электрического заряда.

Присутствовавший при действе король пришёл в неописуемый восторг, а после того как электрическим разрядом умертвили птичку, монарх воскликнул: «Браво!». В одном из парижских монастырей 700 братьев, взявшись за руки, образовали своеобразную живую цепь. Когда крайние монахи коснулись батареи из лейденских банок, остальные синхронно подпрыгнули и издали вопль.

Потом ещё были энтузиасты, которые искрой из пальца поджигали спирт и порох, убивали беззащитных мышей и прочую безропотную живность. В газетах появились сведения о чудесных исцелениях паралича у испытавших прохождение через себя электрических разрядов

Учёные, наблюдавшие и самостоятельно проводившие опыты, заговорили об электрической энергии, которая таинственным образом накапливалась в банках с водой и ещё лучше без оной.

Совершенствование конструкции лейденских банок привело к появлению малогабаритных устройств с пластинами более простой геометрической формы, что делало их более компактными.

Конденсаторы стали изготавливать в виде двух проводников, размещённых близко друг относительно друга таким образом, чтобы электрическое поле создавалось между разноимённо заряженными проводниками и на него меньше влияли посторонние предметы. Этому условию удовлетворяли две пластинки, два коаксиальных цилиндра или две концентрические сферы.

Плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы характеризуются ёмкостью, которую в общем виде на основании уравнения можно представить следующим образом

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U},$$

где U – разность потенциалов между обкладками, именуемая напряжением. Как показано выше, способность проводника сохранять на себе заряд зависит от его геометрии и физических свойств среды, заполняющей пространство между обкладками.

Если заряд на обкладке конденсатора охарактеризовать плотностью, то применительно к плоскому случаю, напряжённость поля определится соотношением

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 s},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, d – расстояние между обкладками, s – площадь обкладок. Разность потенциалов между обкладками можно представить следующим образом

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{Qd}{\epsilon\epsilon_0 s}.$$

Подставим значение разности потенциалов в уравнение ёмкости

$$C = \frac{Q\epsilon\epsilon_0 s}{Qd} = \frac{\epsilon\epsilon_0 s}{d}.$$

Ёмкость плоского конденсатора, таким образом, прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды и площади обкладок, обратно пропорциональна расстоянию между обкладками.

Электрическая энергия, запасаемая при зарядке конденсатора, определится как

$$W = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Подтверждением наличия энергии заряженного конденсатора может служить простой эксперимент с аккумуляторной батареей и лампочкой (рис. 1.59).

Если замкнуть цепь через клемму 1, то конденсатор зарядится от источника. Переведя затем ключ в положение 2, обнаружим вспышку лампы, что свидетельствует о переходе электрической энергии в энергию света и тепла. **Источником энергии в такой установке является электрическое поле, существующее между обкладками конденсатора.**

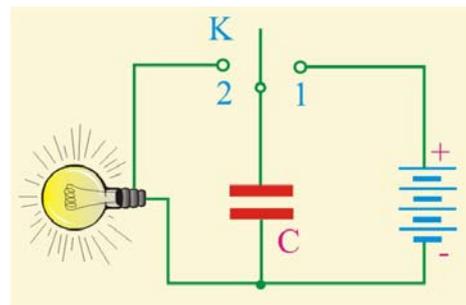


Рис. 1.59. Разряд конденсатора

Естественно предположить, что энергия конденсатора сосредоточена в объёме, расположенном между его обкладками, в этом случае каждую единицу объёма имеет смысл рассматривать с энергетических позиций.

Запишем уравнение электрической энергии плоского конденсатора и выделим в нём в явном виде объём V

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 s}{2d} (Ed)^2 = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} V,$$

где $s \cdot d = V$ – объём пространства между обкладками конденсатора. Введём далее понятие объёмной плотности электрической энергии

$$\varpi = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}.$$

Объёмная плотность энергии характеризует электрическое поле не только применительно к конденсаторам, этот параметр можно использовать для энергетической характеристики любого электрического поля вне зависимости от условий его существования.

1.6. Применение конденсаторов

Как было показано выше, конденсаторы способны накапливать электрическую энергию, что, собственно и предопределило их использование в широчайшем классе устройств, связанных с применением электрической энергии.

Практически невозможно найти область деятельности современного человека, а уж электронное устройство тем более, в которых бы не использовались конденсаторы. Конденсаторы нашли применение в электроэнергетике, во всех видах наземного, воздушного, морского и речного транспорта, во всех, включая мобильную, видах связи, телевидении, радиовещании, локации, акустике, компьютерных технологиях, измерительной и вычислительной технике, средствах автоматики и телемеханики и в других многообразных областях, где люди пытаются использовать энергетические возможности окружающего их пространства.

Другое дело, что часто при реализации своих энергетических притязаний человек теряет чувство собственной перспективной безопасности, но такова уж его суть – как пока единственного известного преобразователя энергии.

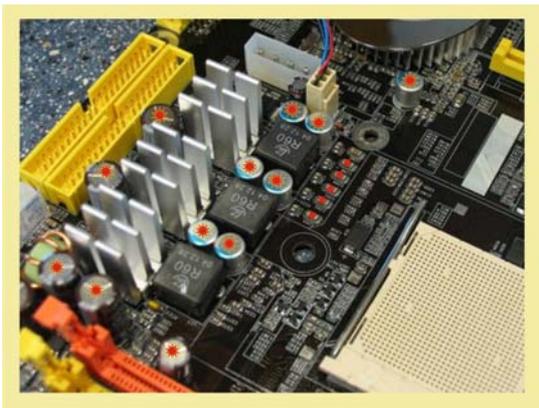


Рис. 1.60. Фрагмент электронной платы

На рис. 1.60 приведён фрагмент электронной платы современного персонального компьютера, красными звёздочками и точками помечены впаиваемые в плату конденсаторы

Кроме способности накапливать электрическую энергию, конденсаторы, будучи нелинейными элементами, могут менять своё сопротивление в зависимости от параметров питающего их напряжения, т.е. могут выполнять некие управляющие функции. Но об этом свойстве конденсаторов поговорим

поже, при рассмотрении цепей переменного тока.

Конденсаторы в отличие от механических накопителей энергии, например, вращающихся маховиков, накапливают энергию несравненно быстрее, потому что, сравнительно без инерционны, это делает возможным использование конденсаторов в различных импульсных процессах, например во вспышках (рис. 1.61), применяемых при фотографировании.



Рис. 1.61. Фотовспышка

В фотовспышках конденсаторы большой электрической ёмкости посредством специального зарядного устройства в течение нескольких секунд накапливают электрический заряд, создавая на обкладках разность потенциалов в несколько тысяч вольт.

Далее конденсатор посредством затвора фотоаппарата подключается к электродам импульсной лампы, заполненной парами одного из химических элементов: ксенона, ёда, ртути и т.п.

В течение сотых долей секунды за счёт высокой разности потенциалов газовый промежуток между электродами

становится проводящим, образуется кратковременный газовый разряд, сопровождающийся сильной световой вспышкой. По такому же принципу работают и прожекторные маяки.

Основой всех этих устройств, основное назначение которых – вспыхивать, являются накопители электрической энергии, конденсаторы, способные генерировать как единичные импульсы тока малой длительности, так и последовательность импульсов.

В настоящее время промышленностью выпускается большое количество типов конденсаторов, характеристики, габариты и стоимость определяются областью их использования.



Рис. 1.62. Многообразие типов и размеров

являясь чувствительными датчиками разного рода перемещений. В простейшем случае плоского конденсатора, его электрическая ёмкость определяется как

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

где s – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды. Из этого уравнения видно, что ёмкость можно изменять тремя величинами: диэлектрической проницаемостью, площадью пластин и расстоянием между ними

Технологически проще всего изменение ёмкости организовать, изменяя расстояние между обкладками. Этот принцип используется в конструкциях многих датчиков. Типичным представителем преобразовательного устройства является конденсаторный микрофон.



Рис. 1.63. Конденсаторные микрофоны

Они являются самыми дешёвыми и самыми дорогими среди устройств аналогичного назначения. В конденсаторном микрофоне одна из обкладок конденсатора выполняется в виде мембраны, которая совершая механические колебания изменяет ёмкость конденсатора по закону падающей упругой волны. Качество и цена микрофона зависит от точности изготовления такого ёмкостного датчика. На рис. 1.63 приведены некоторые виды микрофонов: 1 – микрофон начала прошлого века; 2 – современный высококачественный «сольный» микрофон с, практически, идеальными акустическими характеристиками, 3 – самые распространённые бюджетные микрофоны для массовой бытовой техники.

1.7. Направленное движение электрических зарядов

Как отмечалось ранее, проводники являются таковыми по причине наличия в них большого числа носителей заряда, способных относительно легко перемещаться в пределах рассматриваемого образца.

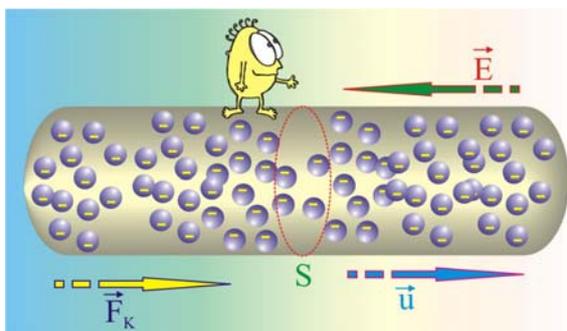


Рис. 1.64. Направленное движение носителей электрического заряда в проводнике

Металлы, как правило, являются хорошими проводниками тепла и электрического тока именно благодаря свободным электронам. Если металлический проводник (рис. 1.64) поместить в однородное электрическое поле напряжённостью \vec{E} , то на каждый свободный электрон ($e \cong 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m_e \cong 1 \cdot 10^{-30}$ кг), в классическом представлении, будет действовать элементарная сила Кулона.

Как и всякий материальный объект, электрон начнёт двигаться в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля (элементарный заряд электрона принято считать отрицательным).

Если бы в распоряжении исследователей был маленький человечек, то он бы обнаружил, что через сечение проводника S , за которым он приставлен наблюдать, в одном направлении движутся электроны, что собственно и означает возникновение электрического тока.

Направлением тока условились считать направление движения положительных зарядов. Таким образом, **электрический ток есть направленное движение носителей зарядов**. В металлах направление тока принимается противоположным движению электронов проводимости.

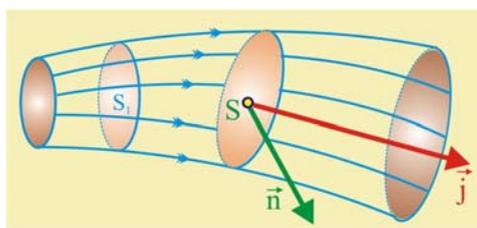


Рис. 1.65. Трубка тока

Линии, вдоль которых перемещаются носители заряда, по аналогии с гидромеханикой называются линиями тока (рис. 1.65). Совокупность линий тока образует трубку тока, которая позволяет качественно и количественно охарактеризовать направленное движение носителей заряда.

Движущиеся в электрическом поле носители не пересекают поверхность трубки тока. Поверхность проводника, расположенного в диэлектрической среде представляет собой трубку тока.

Выделим в проводнике физически малый объём (рис. 1.69) внутри которого направленно движутся со средней скоростью \vec{u} носители заряда. В металлах электроны, будучи свободными частицами, в соответствии с законами термодинамики находятся в состоянии непрерывного хаотического теплового движения, причём средняя скорость $\langle v \rangle$ теплового движения определяется как

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}},$$

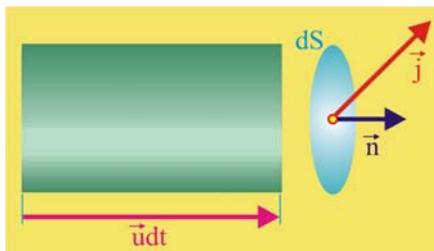


Рис. 1.69. Элементарный объём проводника

где $k_B \cong 1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, m_e – масса электрона.

В отличие от спонтанно направленной скорости теплового движения скорость под действием силы Кулона \vec{u} будет направленной, её называют **средней дрейфовой скоростью**.

Пусть в рассматриваемом металлическом проводнике в единице его объёма содержится n электронов. Выделим далее элементарную площадку dS , перпендикулярную вектору дрейфовой скорости, являющуюся основанием цилиндра с высотой $u dt$. Все носители заряда, содержащиеся внутри этого цилиндра, через площадку dS за время dt перенесут заряд

$$dq = n \cdot e \cdot u \cdot dS \cdot dt.$$

Пронормируем уравнение относительно площади и времени

$$\frac{dq}{dS dt} = j = neu,$$

где j – плотность тока, т.е. сила тока $i = dq/dt$, отнесённая к площади. Плотность тока величина векторная, что определяется направленными свойствами дрейфовой скорости

$$\vec{j} = ne\vec{u}.$$

Модуль плотности тока определяет величину заряда, переносимого электрическим полем в единицу времени через единицу площади. Направление вектора \vec{j} совпадает с направлением дрейфовой скорости носителей заряда. Если в процессе участвуют несколько типов носителей заряда, например положительные и отрицательные ионы, то вектор плотности тока определяется в виде суммы

$$\vec{j} = \sum_{i=1}^{i=n} n_i e_i \vec{u}_i.$$

Используя понятие плотности тока, заряд, переносимый через площадку dS можно определить следующим образом

$$dq = j dS dt,$$

а силу тока, как

$$i = \frac{dq}{dt}, \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А} \right].$$

Сила тока является величиной скалярной, т.к. представляет собой частное от деления двух не векторных величин. **О силе тока в 1 ампер говорят тогда, когда через поперечное сечение проводника в течение одной секунды перемещается заряд в 1 кулон.**

Поскольку человек микроскопических масштабов у исследователей под руками, как правило, не находится, то для обнаружения электрического тока в проводниках приходится довольствоваться наблюдением различных явлений, сопровождающих направленное движение носителей заряда.

Магнитное действие тока. Если медный проводник расположить параллельно магнитной стрелке, ориентированной по магнитному полю Земли, то присутствие проводника не повлияет на ориентацию стрелки. Стоит пропустить по проводнику ток силой i , стрелка – изменит свою ориентацию, она повернётся вокруг своей оси, что свидетельствует о наличии вращающего механического момента. Впервые такой опыт провёл в 1820 г. Эрстед, копенгагенский профессор физики (рис. 1.70).

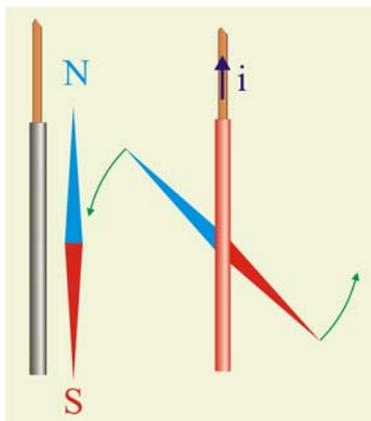


Рис. 1.70. Магнитная стрелка и проводник с током

Поменяв направление тока в проводнике, обнаружим, что северный и южный концы стрелки поменяются местами. Металлический проводник можно заменить жидким, поместив, например в стеклянную трубку раствор серной кислоты в воде, при этом эффект взаимодействия магнитной стрелки с током, протекающим в жидкости останется неизменным. Аналогичный эффект можно наблюдать и для тока текущего по газоразрядной трубке.

Магнитное действие тока наблюдается для проводников всех типов, из чего можно сделать вывод об общем признаке электрического тока создавать собственное магнитное поле.

Магнитное действие тока положено в основу работы магнитоэлектрических приборов для количественного измерения величины силы тока. Между полюсами постоянного магнита помещается лёгкая рамка с намотанной на неё катушкой, ось которой соединена со спиральной упругой пружиной. Протекание по катушке тока вызывает её поворот на определённый угол, пропорциональный силе измеряемого тока.

Химическое действие тока. Химическое действие электрического тока можно наблюдать, пропуская его через водный раствор медного купороса CuSO_4 , в качестве электродов лучше всего использовать угольные стержни, но можно и из другого проводника, например, тривиальные гвозди.

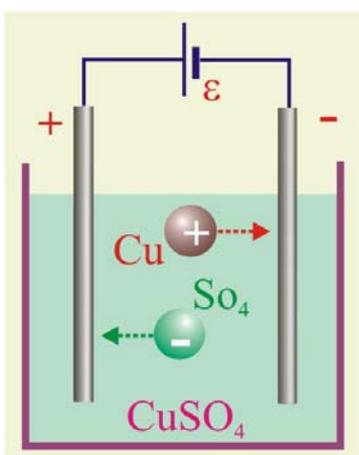
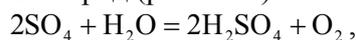


Рис. 1.71. Разложение током медного купороса

Соединив электроды с аккумуляторной батареей, и выждав некоторое время (несколько минут), можно обнаружить на отрицательном угольном электроде хорошо заметный невооружённым взглядом налёт блестящего слоя меди.

На положительном электроде станет выделяться остаток SO_4 , но он не обнаруживается, потому что в присутствии воды превращается в серную кислоту и молекулярный кислород (рис. 1.71)



т.е. в растворе появится серная кислота, а на положительном электроде будет выделяться газообразный кислород. При силе тока через раствор более 5 А положительный электрод будет покрыт пузырьками, которые коагулируя под действием силы Архимеда всплывают на поверхность раствора.

Тепловое действие тока. Тут никаких специальных опытов ставить не требуется. Достаточно потрогать корпус любого работающего бытового устройства, чтобы стало ясно, при прохождении по проводникам электрического тока выделяется тепло. Пропуская через проводник ток, его можно нагреть до плавления металла и даже испарить, что собственно используется во всякого рода предохранителях, рабочий элемент которых выполняется и легкоплавких сплавов, с тем, чтобы при внезапном скачке силы тока расплавилась предохранительная вставка, а не основные проводники.

1.8. Основные законы постоянного тока

Для большого класса проводящих веществ, в частности для металлов, плотность электрического тока \vec{j} пропорциональна напряжённости электрического поля \vec{E} . Это обстоятельство составляет один из важных законов электродинамики, хотя он, по большому счёту и не рассматривается как фундаментальный. Он весьма значим для практических целей. Математически закон представляется следующим образом

$$\vec{j} = \lambda \vec{E},$$

где λ – постоянная величина для данного проводника, именуемая **удельной проводимостью**.

Уравнение выражает собой **закон Ома в дифференциальной форме**. Удельная проводимость зависит от физических свойств проводника, а так же от внешних условий, таких как температура, давление и др. Величина обратная удельной проводимости называется **удельным сопротивлением**

$$\rho = \frac{1}{\lambda}.$$

Закон Ома в интегральной форме получается при наличии разности потенциалов между отдельными его участками. Рассмотрим электрическую схему, изображённую на рис. 1.72.

Она состоит из цилиндрического проводника постоянного сечения с высоким удельным сопротивлением, например из вольфрама, аккумуляторной батареи, амперметра и чувствительного вольтметра, служащего для измерения разности потенциалов.

Включив схему и перемещая скользящий контакт вдоль проводника из положения 1 в положение 2, обнаружим, что показания вольтметра увеличиваются по закону

$$i = kU.$$

Если длину проводника обозначить через l , а напряжённость электрического поля в нём – E , то можно записать следующее уравнение

$$E = -\frac{d\varphi}{dl} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l}.$$

При возникновении в проводнике тока он будет течь от большего потенциала φ_1 к меньшему потенциалу φ_2 . Таким образом, **для существования тока в проводнике необходимо поддерживать на его концах разность потенциалов**, т.е. условие возникновения электрического тока определится как

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \neq 0.$$

Условие может быть обеспечено наличием замкнутой цепи, в которую последовательно с проводником включён источник тока. При разомкнутой цепи на отрицательных клеммах источника имеется избыток электронов, а на положительных – недостаток.

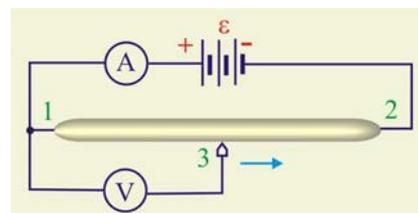


Рис. 1.72. К выводу закона Ома в интегральной форме

Внутри источника действуют, так называемые сторонние силы, механического, химического, биологического и теплового типа, которые обеспечивают разделение зарядов.

Перемещение зарядов в замкнутой цепи осуществляется за счёт сил не электростатического происхождения, работа которых, как известно, по замкнутому контуру всегда должна быть равной нулю. **Перемещение по проводнику носителей заряда (электронов или ионов) осуществляется за счёт работы, производимой сторонними силами.**

Эта работа определяется в виде суммы работы, совершаемой против сил электрического поля внутри источника тока ($A_{\text{Ист}}$), а так же работы против сил сопротивления среды источника ($A_{\text{Внутр}}$)

$$A_{\text{Стор}} = A_{\text{Ист}} + A_{\text{Внутр}}.$$

Электродвижущей силой (ЭДС) источника тока называется отношение работы сторонних сил к величине заряда, перемещаемого вдоль всей цепи, включая и источник тока

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{Стор}}}{q} = \frac{A_{\text{Ист}} + A_{\text{Внутр}}}{q}.$$

Работа против сил электрического поля определится как

$$A_{\text{Ист}} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

В режиме холостого хода, когда клеммы источника разомкнуты $A_{\text{Внутр}} = 0$, поэтому

$$\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Под действием силы Кулона свободные носители заряда, в частности – электроны, должны двигаться с ускорением

$$\vec{a} = \frac{e\vec{E}}{m_e},$$

т.е. скорость зарядов должна вроде как возрасти со временем, как и плотность тока

$$\vec{j} = \rho\vec{u} = \rho a\vec{t}.$$

Однако движение зарядов в проводнике происходит не в пустом пространстве. Движущиеся электроны в классическом представлении, являясь частицами, обременёнными массой покоя, при своём перемещении сталкиваются с элементами кристаллической решётки, в частности с ионами, которые более массивны и обладают большими размерами.

Поэтому в уравнении плотности тока вместо неопределённого времени t , должно рассматриваться время между столкновениями отдельно взятого электрона и ионами τ . Уравнение скорости в этом случае уместно представить так

$$\vec{u} = \frac{eE\tau}{m_e}.$$

Таким образом, скорость электрона за время τ будет увеличиваться до некоторого максимума, затем при столкновении с ионом она становится равной нулю, в этой связи, в среднем скорость движения зарядов по проводнику принимается постоянной.

На участке проводника $d\ell$ напряжённость электрического поля связана с потенциалом стандартным уравнением

$$d\varphi = -Ed\ell = -\frac{j d\ell}{\lambda}.$$

Умножим и разделим правую часть уравнения на площадь поперечного сечения проводника S

$$d\varphi = -\frac{j d\ell S}{\lambda S} = -i \frac{d\ell}{\lambda S}.$$

Проинтегрируем далее уравнение по длине проводника от точки 1 до точки 2 (рис. 1.72)

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi = -i \int_0^{\ell} \frac{d\ell}{\lambda S},$$
$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = i \int_0^{\ell} \frac{d\ell}{\lambda S}.$$

Величина подынтегрального выражения не зависит от силы тока и разности потенциалов на концах проводника, оно определяется физическими свойствами металла и его геометрическими характеристиками. Оно называется электрическим сопротивлением

$$R = \int_0^{\ell} \frac{d\ell}{\lambda S} = \frac{\ell}{\lambda S} = \frac{\rho \ell}{S}.$$

Электрическое сопротивление проводника R прямо пропорционально удельному сопротивлению материала проводника ρ , длине проводника l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.

Подставим далее значение сопротивления в уравнение разности потенциалов, получим:

$$U = iR.$$

Это уравнение называют **законом Ома в интегральной форме**. Если рассматривается цепь постоянного тока, то закон Ома принято записывать в следующем виде

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

Электрическое сопротивление измеряется в Омах и производных единицах

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}} = \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

На практике используются единицы большего достоинства, килоомы ($1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$) и мегаомы ($1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$). Разберёмся далее, что следует подразумевать под понятием «скорость движения носителей заряда» в свете того, что их очень много и движутся они весьма разнообразно.

В отсутствие электрического поля электроны, как отмечалось выше, имеют спонтанные скорости хаотического теплового движения. При действии поля у электронов появляется, так называемая, дрейфовая скорость \bar{u} . Именно эта скорость в классической интерпретации определяет электрический ток.

В гидромеханике, например, при рассмотрении количества жидкости истекающей из трубы, не существенно, как движется отдельно взятая частица воды. Важно знать скорость струи и площадь её поперечного сечения.

Таким образом, величина u является дрейфовой скоростью электрона в присутствии поля. Концентрация электронов проводимости в металлах имеет порядок $n_e = 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$, средняя длина свободного пробега по порядку величины совпадает с расстояниями между узлами кристалла $\langle \lambda \rangle \cong 10^{-10} \text{ м}$. Уподобив электроны атомам идеального газа, можно оценить скорость их теплового движения, получим:

$$\frac{m_e \langle v \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} k_B T; \Rightarrow \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}},$$

где $\langle v \rangle$ – средняя квадратичная скорость электронов, m_e – масса электрона, $k_B \cong 1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Например, для $T = 300$ К

$$\langle v \rangle \cong \sqrt{\frac{3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1 \cdot 10^{-30}}} \cong 1,12 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Определим далее величину дрейфовой скорости в медном проводнике с площадью поперечного сечения $1 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Если по проводнику течёт ток силой 1А, то его плотность будет равна

$$j = \frac{I}{S} = 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Концентрацию свободных электронов определим через плотность меди $\rho \cong 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и её молярную массу $\mu = 63,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, приняв во внимание, что у меди один валентный электрон, который и экспортируется каждым атомом в нестройные ряды электронного газа. Количество вещества, как известно, определяется в виде отношения $\nu = \rho/\mu$, умножив которое на величину числа Авогадро $N_A \cong 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, получим число атомов в единице объёма, т.е. концентрацию свободных электронов

$$n_e = N_A \frac{\rho}{\mu} \cong \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 8,9 \cdot 10^3}{63,5 \cdot 10^{-3}} \cong 8 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{м}^3}.$$

Дрейфовая скорость в этом случае равна:

$$u = \frac{j}{n_e} \cong \frac{1 \cdot 10^6}{8 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 7,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 28 \frac{\text{см}}{\text{час}}.$$

Результат несколько обескураживающий. **Дрейфовая скорость свободных электронов на восемь порядков меньше скорости теплового движения.** Даже если на несколько порядков увеличить плотность тока, что может, в конечном счёте, привести к тепловому разрушению целостности проводника, то всё рано, скорость теплового движения будет существенно превосходить дрейфовую скорость.

Электрон в электрическом поле испытывает действие кулоновской силы $F = eE$ и приобретает ускорение, поэтому, строго говоря, в течение времени пробега скорость электрона увеличивается, а при столкновении с ионом обращается в нуль. За время $\tau = \langle \lambda \rangle / \langle v \rangle$, т.е. за время между двумя соударениями дрейфовая скорость от нулевого значения возрастёт до

$$u_{\text{max}} = a\tau = \frac{eE\tau}{m_e}.$$

Средняя величина дрейфовой скорости, при этом, будет равна

$$\langle u \rangle = \frac{u_{\text{max}}}{2} = \frac{eE \langle \lambda \rangle}{2m_e \langle v \rangle}.$$

Подставим значение средней скорости дрейфа в уравнение плотности тока

$$j = \frac{n_e e^2 \langle \lambda \rangle}{2m_e \langle v \rangle} E,$$

комбинация величин, являющихся коэффициентом пропорциональности между плотностью тока и напряжённостью электрического поля является **электропроводностью или проводимостью**

$$\vec{j} = \lambda \vec{E}.$$

Таким образом, снова приходим к уравнению закона Ома в дифференциальной форме.

Полученные выше результаты не следует рассматривать как безусловное количественное подтверждение теории. Некоторые положения классической теории электропроводности металлов не согласуются с экспериментальными результатами, о трудностях этой, несомненно, передовой для своего времени, теории разговор впереди.

Как это следует из уравнений, работа против сил поля внутри источника (рис. 1.73), тока выражается через падение напряжения на внешнем сопротивлении R

$$A_{\text{ист}} = qU,$$

В замкнутой цепи работа против сил сопротивления среды источника $A_{\text{внутр}}$ обуславливает падение напряжения внутри самого источника

$$A_{\text{внутр}} = qU_{\text{внутр}},$$

т.е. можно считать, что **источник обладает внутренним сопротивлением r** . Падение напряжения на источнике можно тогда записать на основании закона Ома следующим образом:

$$U_{\text{внутр}} = Ir.$$

ЭДС источника в такой постановке вопроса можно представить в виде суммы падений напряжения на внутреннем сопротивлении источника и во внешней цепи $\varepsilon = Ir + U = Ir + IR$,

откуда следует

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Последнее уравнение является математическим выражением **закона Ома для замкнутой цепи, содержащей источник тока**.

В предыдущем подразделе были показаны некоторые применения конденсаторов, как накопителей электрической энергии. Познакомившись с основными законами постоянного тока, разберёмся с особенностями процессов накопления энергии, это особенно важно при использовании конденсаторов различного рода импульсных устройств типа фотовспышки.

Для зарядки и разрядки конденсатора может использоваться цепь, схема которой приведена на рис. 1.74. Если переключатель поставить в положение 1, то конденсатор C начнёт заряжаться от источника с ЭДС ε через сопротивление цепи R , включающее и внутреннее сопротивление источника.

Начиная с момента времени, соответствующего замыканию переключателя в цепи возникнет электрический ток, зависящий от времени $i(t)$, переносящий положительный заряд на левую пластину конденсатора $q(t)$. Падение напряжения на конденсаторе, с одной стороны, можно представить как разность между ЭДС источ-

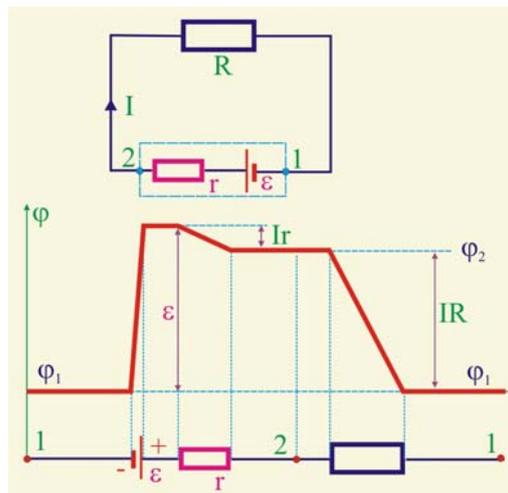


Рис. 1.73. Замкнутая цепь с источником

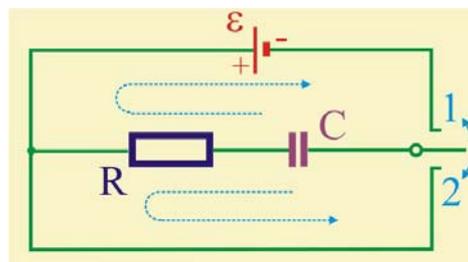


Рис. 1.74. Цепь для зарядки конденсатора

ника и напряжением на нагрузке, с другой стороны, как отношение доставленного заряда к величине ёмкости конденсатора

$$\varepsilon - iR = \frac{q}{C}.$$

Рассматривая процесс зарядки конденсатора с позиций закона сохранения заряда, изменение заряда конденсатора может протекать только при наличии тока i , поэтому

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Совместим два последних уравнения

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \varepsilon,$$

но

$$\frac{dq}{dt} = i, \quad \frac{q}{C} = U,$$

тогда

$$U = \varepsilon - Ri,$$

где i – мгновенное значение силы тока, U – падение напряжения на конденсаторе.

С другой стороны,

$$\frac{q}{C} = \varepsilon - \frac{dq}{dt} R, \Rightarrow R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \varepsilon.$$

Преобразуем последнее уравнение к виду более удобному для интегрирования

$$\frac{RCdq}{dt} = \varepsilon C - Q, \quad \frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\frac{dt}{RC},$$
$$\int \frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\int \frac{dt}{RC}, \quad \ln(q - C\varepsilon) = -\frac{t}{RC} + K,$$

где K – произвольная постоянная интегрирования.

Определим K по начальным условиям, т.е. при $t = 0, q = 0$

$$\ln(-C\varepsilon) = K,$$

и подставим значение K в предыдущее уравнение

$$\ln(q - C\varepsilon) - \ln(-C\varepsilon) = -\frac{t}{RC},$$

или, после преобразования

$$\ln\left(1 - \frac{q}{C\varepsilon}\right) = -\frac{t}{RC}.$$

Избавимся далее от логарифма в левой части

$$1 - \frac{q}{C\varepsilon} = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right),$$

и решим полученное уравнение относительно искомой величины $q(t)$ заряда конденсатора

$$q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).$$

Получим зависимость зарядного тока в функции времени, для чего достаточно продифференцировать полученное уравнение заряда по времени

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

Изменение напряжения на конденсаторе будет протекать в соответствии с уравнением

$$U(t) = \frac{q(t)}{C} = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

Величина $RC = \tau [Ом \cdot Ф \equiv (В/А) \cdot (Кл/В) \equiv Кл/(Кл/с) \equiv с]$ – называется постоянной времени. Постоянная времени характеризует промежуток времени, за который заряд на конденсаторе достигает $(1 - e^{-1})$ или 63% своего максимального значения, т.е. $0,63C\varepsilon$. Значение τ , таким образом, характеризует скорость зарядки конденсатора.

Из (1.170) следует, что заряд может достичь своего максимального значения $Q = C\varepsilon$, только через бесконечно большое время. Рассмотрим динамические особенности процесса на конкретном примере.

Пусть цепь составлена из последовательного соединения конденсатора ёмкостью $C = 2$ мкФ, резистора сопротивлением $R = 1,5$ кОм, и источника тока с ЭДС $\varepsilon = 12$ В. Определим постоянную времени и установим зависимость заряда и напряжения на конденсаторе от времени.

1. Определим постоянную времени заданной цепи

$$\tau = RC = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

2. Максимальная величина заряда конденсатора определится из соотношения

$$Q_{\max} = C\varepsilon = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл} \equiv 25 \text{ мкКл.}$$

3. Определим зависимость заряда, напряжения и зарядного тока от времени

$$Q(t) = 2,4 \cdot 10^{-5} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

$$i(t) = 8 \cdot 10^{-3} \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

$$U(t) = 12 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

4. Представим расчетные данные для заряда конденсатора и протекающего по нему тока в виде соответствующих графиков (рис. 1.75).

Как и следовало ожидать, кривые имеют экспоненциальный вид, т.е. заряд конденсатора и сила тока асимптотически приближаются к своим экстремальным значениям.

Если заряженный конденсатор отсоединить от источника, т.е. перевести переключатель в положение 2 (рис.1.74) и замкнуть на сопротивление, то, описанные выше процессы, начнут протекать в обратной последовательности. Уравнение переписывается при условии $\varepsilon = 0$

$$\frac{dq}{dt} R + \frac{Q}{C} = 0.$$

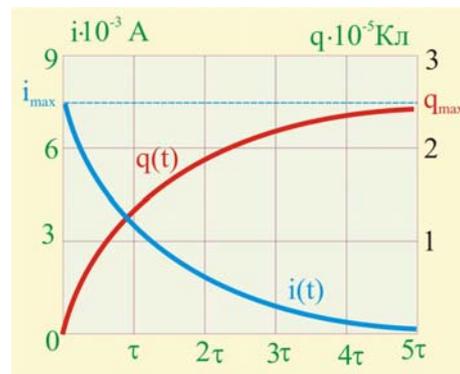


Рис. 1.75. Зависимость от времени величины заряда конденсатора

Решение этого уравнения для заряда и силы тока будут иметь вид

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}},$$
$$q(t) = q_{\max} e^{-\frac{t}{RC}},$$

т.е. сила тока в цепи и заряд конденсатора убывают во времени по экспоненциальному закону, с той же постоянной времени.

Время разряда конденсатора можно существенно сократить, если использовать в качестве разрядного, сопротивление малой величины. В импульсной лампе фотовспышки сопротивление разрядного промежутка составляет десятые доли Ома, в то время как зарядная цепь обладает во много раз большим сопротивлением.

Если на концах неподвижного проводника имеется разность потенциалов $U = (\varphi_2 - \varphi_1)$, то электрический заряд Δq , перемещаясь из точки 2 с большим потенциалом, в точку 1, с меньшим потенциалом (рис. 1.73) теряет часть своей энергии на преодоление сопротивления

$$dW = dq \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = dq \cdot U.$$

Заряд можно выразить через силу тока и время

$$I = \frac{dq}{dt}, \Rightarrow dq = Idt,$$

энергия с учётом этого запишется так

$$dW = IUdt.$$

Вполне резонен вопрос: «Куда девается эта энергия?». В кинетическую энергию она явно не переходит, т.к. никаких движений в макроскопическом варианте не возникает.

В неподвижном проводнике движущиеся носители заряда сталкиваются с ионами металла и, отдавая им энергию, повышают тем самым температуру проводника. Это было замечено и экспериментально, что всякий проводник, по которому течёт ток, имеет температуру выше окружающей среды.

Другими словами, носители заряда, получая энергию от электрического поля, часть её расходуют на нагревание проводника, таким образом, работа, производимая при перемещении заряда, имеет вполне определённый тепловой эквивалент

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} IUdt.$$

Если сила тока и разность потенциалом во времени не меняются, то уравнение упрощается

$$\Delta Q = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Уравнение выражает собой закон Джоуля – Ленца. Этот закон установлен был в 1841г. Дж. Джоулем и в 1842 г. независимо, Эмилем Христофоровичем Ленцем, профессором Петербургского университета.

Закону можно придать иное математическое выражение, если ввести в рассмотрение параметры сопротивления и плотность тока для проводника конечной длины

$$\delta Q = I^2 \rho_R \frac{d\ell}{s} dt = \rho_R j^2 s d\ell dt,$$
$$Q = \rho_R j^2 V dt,$$

где V – объём проводника, ρ_R – удельное сопротивление.

Рассмотрим пример применения закона Джоуля – Ленца при замыкании обкладок конденсатора ёмкостью C , заряженного до разности потенциалов U на сопротивление R . Определим количество выделившегося при этом тепла.

Запишем уравнение количества тепла в следующем виде

$$Q = \int_0^{\infty} IU dt = \int_0^{\infty} i^2(t) R dt .$$

Подставим зависимость силы тока от времени

$$Q = \frac{U^2}{R} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{RC}} dt = \frac{U^2}{R} \frac{RC}{2} = \frac{CU^2}{2} .$$

Анализ последнего уравнения показывает, что вся электрическая энергия, запасённая в конденсаторе, переходит в тепло. Тепловая мощность (энергия, выделяемая в единицу времени) при этом определится как

$$N = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} .$$

Определим далее мощность, выделяемую в единице объёма проводника, т.е. плотность теплового потока в проводнике длиной l и площадью поперечного сечения S .

Разность потенциалов на концах проводника можно выразить через напряжённость поля $U = El$, а его сопротивление R – через удельное сопротивление

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\ell}{\lambda S} ,$$

откуда следует, что

$$N = \frac{U^2}{R} = E^2 \ell^2 \frac{\lambda S}{\ell} = V \lambda E^2 .$$

Плотность тепловой мощности запишется следующим образом:

$$\varpi = \frac{N}{V} = \lambda E^2 = \vec{j} \cdot \vec{E} .$$

Следует заметить, что вопрос о выделении тепла в проводниках неоднозначен. Чаще всего с тепловыделениями борются всеми известными способами, потому как выделение тепла в проводнике при протекании по нему тока оборачивается прямыми убытками.

В ряде радиотехнических устройств используются даже посеребренные медные проводники, а в ряде, особо ответственных цепях, даже позолоченные. За повышение энтропии окружающего пространства приходится платить реальные деньги.

Но есть случаи, когда тепловыделение нужно максимизировать, например, при изготовлении различных нагревательных элементов. Для этого используют специально созданные проводники с высоким удельным сопротивлением.

1.9. Эффективность источников тока

Полученные уравнения закона Ома и следствия из них однозначно говорят о зависимости выделяемой в цепи электрической энергии от сопротивления. Особый интерес такая зависимость приобретает при проектировании и эксплуатации источников питания, химических, в частности.

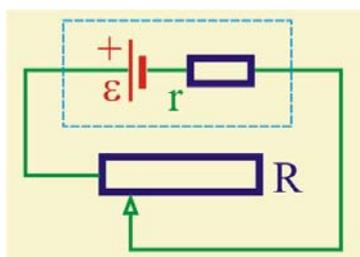


Рис. 1.76. Цепь с переменной внешней нагрузкой

Рассмотрим источник тока с заданной величиной ЭДС ε и внутренним сопротивлением r нагруженный на внешнее сопротивление R (рис. 1.76). В соответствии с полученными выше уравнениями на сопротивлении будет выделяться активная электрическая мощность N_a

$$N_a = UI = I^2 R = \varepsilon^2 \frac{R}{(R + r)^2}.$$

Для выяснения величины максимально возможной активной мощности $N_{a(\max)}$ будем изменять величину внешнего сопротивления до величины R_m . Математически это означает определение экстремума функции $N_a = f(R)$ путём её дифференцирования по сопротивлению и приравнивания производной к нулю, стандартная процедура нахождения экстремума функции

$$\frac{dN_a}{dR} = \varepsilon^2 \frac{r^2 - R_m^2}{(r + R_m)^4} = 0.$$

Так как R и r всегда положительные величины, то записанное выше условие выполняется при $r = R_m$. Мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает возможно большего значения при равенстве внутреннего источника тока и внешнего сопротивления. Сила тока в этом режиме составит

$$I = \frac{\varepsilon}{2r}.$$

Максимально возможная сила тока в цепи будет иметь место при $R = 0$, т.е. в режиме **короткого замыкания** клемм источника тока

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Наибольшее значение мощности при этом составит:

$$N_{a(\max)} = \frac{\varepsilon^2}{4r}.$$

Как видно из полученных выше уравнений часть мощности источника рассеивается на его внутреннем сопротивлении. Естественно, что при $r = 0$ (идеальный источник тока) такой ситуации не возникает.

Для реальных же источников целесообразно ввести, исходя из «не производственных» потерь, понятие коэффициента полезного действия. Если мощность, рассеиваемую на самом источнике определить как

$$N_i = rI^2,$$

то полная мощность будет равна

$$N = RI^2 + rI^2 = \varepsilon I.$$

Коэффициент полезного действия источника тока при такой постановке вопроса определится традиционно

$$\eta = \frac{N_A}{N} = \frac{U}{\varepsilon}.$$

Очевидно, что при $r \neq 0$ КПД источника будет всегда меньше единицы. Коэффициент полезного действия источника тока зависит от величины внутреннего и внешнего сопротивлений, его величину можно записать следующим образом

$$\eta = \frac{RI}{(R+r)I} = \frac{R}{R+r}.$$

Более строгий вывод уравнения КПД делается на основе анализа энергетических соотношений. Рассмотрим условия работы источника тока, замкнутого на внешнее сопротивление. Ток в цепи определяется законом Ома,

$$I = \frac{\varepsilon}{r+R},$$

умножим обе части этого уравнения на ε

$$I\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R+r}.$$

Мощность, выделяющаяся на нагрузке, считается полезной

$$N_A = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}.$$

Полная мощность, выделяемая источником

$$N = \frac{\varepsilon^2}{(R+r)}.$$

Коэффициент полезного действия источника тока определяется в виде отношения полезной мощности к полной мощности, т.е.

$$\eta = \frac{N_A}{N} = \frac{R}{(R+r)}.$$

На рис. 1.78 приведена зависимость полной мощности (кривая 1), полезной мощности (кривая 2) и коэффициента полезного действия (кривая 3) в функции величины внешнего сопротивления.

Полная мощность и сила тока имеют максимальное значение при $R = 0$, т.е. в режиме короткого замыкания. При этом равны нулю полезная мощность и коэффициент полезного действия. При $R = r$ полная мощность и ток равны половине своих максимальных значений. Коэффициент полезного действия источника равен 0,5. Полезная мощность (кривая 2) достигает своего максимального значения.

Естественно, что режим $R \approx r$ предпочтительнее прочих, однако есть один важный нюанс. Если в качестве источника использовать химический элемент, например автомобильный аккумулятор, то в процессе его разрядки, например при пуске двигателя, растёт внутренне сопротивление.

С позиций коэффициента полезного действия нагрузку целесообразно делать много больше внутреннего сопротивления, в этом случае КПД источников максимальны.

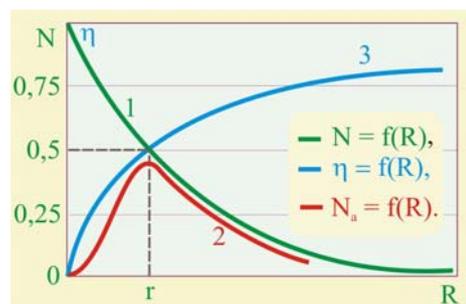


Рис. 1.77. Параметры источника тока

1.10. Химические источники постоянного тока

Изобретение Алесандро Вольта, позволившее провести очень важные исследования особенностей проявления постоянного электрического тока, открыло широкие возможности для использования электрической энергии.

Сейчас трудно представить действительность без «потомков» вольтова столба, которые внедрились во все сферы жизни современного человека от транспортных средств до средств мобильной связи и телекоммуникаций.

Вольтов столб являясь типичным представителем химических источников тока, не претерпел принципиальных изменений за 145 лет своих бесчисленных трансформаций, которые заключались, в основном в использовании всё более эффективных материалов и компонентов.



Рис. 1.78. Спасательный жилет

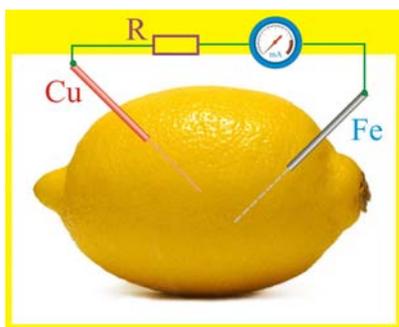


Рис. 1.79. Источник тока из обычного лимона

Принцип действия в течение этого времени, как и двигателей внутреннего сгорания, остался неизменным. Кстати, до недавнего времени в спасательных морских (рис. 1.78) жилетах использовались для питания световых маячков 1 источники тока 2, которые начинали работать, как только между электродами появлялась морская солёная вода, играющая роль электролита.

Простейший химический источник тока можно изготовить в домашних условиях, как говорится из подручных материалов (рис. 1.79), для этого нужно взять лимон и два стержня, один медный, а второй железный, можно обычный гвоздь.

Стержни через нагрузочное сопротивление необходимо соединить с миллиамперметром или со светодиодом и зафиксировать появление в цепи электрического тока.

Современные химические источники тока работают по аналогичному принципу. За счёт реакции окисления при взаимодействии с электролитом на одном из электродов образуется избыток электронов, которые переносятся по цепи при её замыкании.

В обычных элементах, естественно, окислительная реакция протекает до выработки вещества, заложенного в элемент при изготовлении. В аккумуляторах такая реакция обратима, при зарядке восстанавливается исходное состояние веществ.

По первости в химических источниках использовали жидкий электролит, что доставляло определённые эксплуатационные неудобства.

Реакция окисления сопровождалась выделением газа, поэтому элемент нельзя было сделать герметичным, со всеми вытекающими последствиями в виде протекания агрессивного электролита. Однако в 1888 г. немецкий инженер Карл Гасснер, анализируя существующие конструкции, соединил два изобретения, прямо как небезызвестный А. Эйнштейн, Жоржа Лекланше и Тибо.

Получился распространённый и в настоящее время, так называемый, солевой элемент. За 120 лет со дня получения патента конструкция, практически не изменилась (рис. 1.80).

По оценкам экспертов в год таких элементов выпускается более 20 миллиардов штук. Их популярность в современном мире обусловлена относительной дешевизной, хотя их характеристики находятся далеко не на первых позициях.

Батарейка размера AA обладает в среднем ёмкостью около 1 ампер-часа, это не значит, что ток в 1А батарейка может обеспечивать в течение часа. При максимальных токах происходит интенсивное перемешивание электролита, сопровождающееся замедлением переноса ионов, что приводит к падению силы тока.

В 1959 г. специалисты фирмы Energizer разработали химические элементы со щелочным электролитом.

Материал токосъёмника и анода остался прежним. Цинковый анод и угольный токосъёмник (рис. 1.81). Анод представлял собой пастообразную массу в виде смеси порошка цинка и щелочного электролита.

Анод отделён от катода полиэфирной мембраной, прозрачной для ионов. Такой электролит хорошо перемешивается, что позволяет получить более чем в два раза большую ёмкость по сравнению с соевыми источниками.

В этой связи применение щелочных элементов целесообразно в устройствах с относительно высокими потребностями тока. Так, например, для питания электронных часов щелочные батарейки не имеют смысла, потому что в этом случае необходимы элементы с большой длительностью генерирования малых токов, а вот в фотовспышках предпочтительнее щелочные источники.

Щелочные батарейки часто в торговую сеть поступают как «алкалиновые» (от английского alkaline – щелочь), причём зачастую цены на батарейки весьма слабо зависят от их качества.

Фирмы Samsung и ей подобные, выпускающие собственную электронную аппаратуру, покупая патенты на производство химических элементов тока, в целях рекламы своей продукции устанавливают вполне демократичные цены, в то время как менеджеры фирмы Duracell навязывают потребителям переплаты в разы за знаменитого зайчика.

На внутреннем российском рынке алкалайновые батарейки стоят в среднем в пять раз дороже соевых. За это фирмы производители обещают, что их продукция по всем параметрам от пяти до десяти раз превосходит «обычные» батарейки. Вся интрига заключается в том, что никто не знает, что такое «обычная» батарейка и какими параметрами она обладает. Конечно, если в качестве «обычной» рассматривать элемент Вольты или элемент на основе лимона, то реклама – права.



Рис. 1.80. Соевые источники тока



Рис. 1.81. Химический алкалайновый элемент]



Рис. 1.82. Автомобильный кислотный – свинцовый аккумулятор

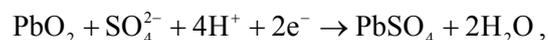
пуска протекают токи порядка сотен ампер, особенно в зимнее время, когда технические жидкости резко повышают свою вязкость. В этой связи аккумуляторные батареи являются предметом постоянного внимания всех опытных водителей

После очередной ударной работы аккумулятора во время пуска двигателя он разряжается, подзарядка производится во время работы двигателя от генератора. Другими словами, автомобильный аккумулятор прибор с циклической перезарядкой. Большинство автомобильных аккумуляторов генерируют на своих клеммах ЭДС $\varepsilon = 12 \text{ В}$.

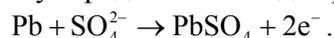
Активные материалы, используемые в аккумуляторах, допускают многократное восстановление при последующих перезарядках. По сути, этот тип химического источника тока является совокупностью окислителя, восстановителя и электролита. Отрицательный электрод одновременно выполняющий роль восстановителя в процессе электрохимической реакции отдаёт электроны и окисляется, а положительный электрод (окислитель) восстанавливается. В качестве электролита используются жидкости с высокой ионной и малой электронной проводимостью.

Наиболее распространённые в настоящее время свинцово – кислотные аккумуляторы были изобретены в 1859 г. французским физиком Гастоном Планте. Принцип их действия основан на электрохимических реакциях свинца и диоксида свинца в водном растворе серной кислоты.

В процессе разряда аккумулятора происходит восстановление свинца на катоде и окисление этого элемента на аноде. Зарядка аккумулятора сопровождается процессами, протекающими в обратном направлении с добавлением реакции электролиза воды, сопровождающейся выделением кислорода на положительном электроде и водорода – на отрицательном электроде. Таким образом, на аноде протекает реакция:



реакция, протекающая слева направо, соответствует процессу разрядки аккумулятора, а справа налево – процессу зарядки. На катоде протекает реакция:



В режиме генерирования тока, в аккумуляторе расходуется серная кислота с образованием воды, при этом плотность электролита падает. В процессе зарядки образовавшаяся вода используется на восстановление серной кислоты, что приводит к увеличению плотности электролита.

Другим распространённым химическим источником тока является автомобильный аккумулятор (рис. 1.82), неременный и очень важный атрибут любого самодвижущегося средства от полудетского мопеда до гоночных болидов.

Основное назначение аккумулятора в автомобиле, крутить с заданной частотой вращения стартер при запуске. Кроме того, аккумулятор подключается к потребителям электроэнергии, когда не хватает мощности штатного генератора.

Основным потребителем, таким образом, является стартер, через который во время

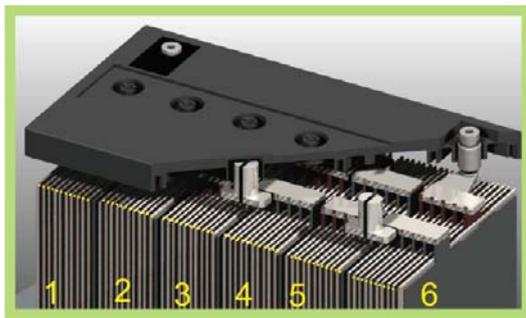


Рис. 1.83. Устройство аккумулятора

Положительные электроды изготавливаются из перекиси свинца (PbO_2), отрицательные – из губчатого свинца (Pb). В виду рыхлой структуры губчатого свинца до недавнего времени в его состав вводили 1 – 2 % сурьмы, вещество не с лучшей экологической репутацией.

В настоящее время в роли легирующих компонентов стали выступать соли кальция. Наибольшая проводимость используемого электролита, в виде водного раствора серной кислоты (H_2SO_4), наблюдается при плотности электролита $\rho \approx 1,26 \text{ г/см}^3$, в зимнее время рекомендуется поднимать плотность до $1,29 - 1,31 \text{ г/см}^3$. в совсем современных аккумуляторах вспененный свинец заменён вспененным карбоном, покрытым плёнкой свинца. Жидкий электролит заменяется пастообразным железиванным веществом.

Бытовые аккумуляторы изготавливаются либо под стандартные размеры батареек, либо специальной формы под размеры устройств, например фотоаппаратов или мобильных телефонов. Такие многозарядные химические источники тока выпускаются нескольких типов: **никель – кадмиевые, никель – металлгидридные, литий – ионные и литий – полимерные.**

Принцип действия щелочных никель – кадмиевых аккумуляторов $\text{Ni} - \text{Cd}$, в принципе, известен давно, они были изобретены в 1899 г. Вальдмаром Юргеном, но получили промышленное распространение сравнительно недавно из-за сравнительной дороговизны используемых при изготовлении материалов.

В 1932 г. была освоена технология нанесения активного материала пластин методом осаждения на пористый никелированный электрод. В окончательном виде в 1947 г. аккумуляторы этого типа появились стараниями немецких инженеров, освоивших технологии, обеспечивающие рекомбинацию газов, выделяющихся в

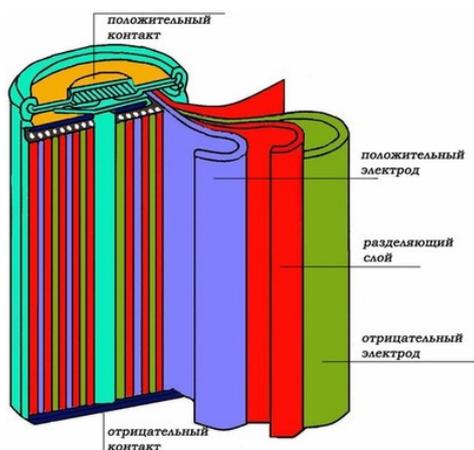


Рис. 1.84. Никель-кадмиевый малогабаритный аккумулятор

процессе разряда без их отвода через специальные отверстия. Аккумулятор стал герметичным, и его работоспособность не зависела от пространственной ориентации.

В никель – кадмиевых аккумуляторах (рис. 1.84) анодом служит электрод, выполненный из гидрата закиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_2$ с графитовым порошком в концентрации до 8%, в качестве электролита используется гидроксид калия KOH плотностью $\rho \approx 1,19 - 1,21 \text{ г/см}^3$ с добавлением гидроксида лития LiOH . В качестве катода используется гидрат закиси кадмия $\text{Cd}(\text{OH})_2$ или металлический кадмий Cd в виде порошка.

ЭДС одного блока таких аккумуляторов составляет 1,37 В, они допускают в зависимости от режимов эксплуатации от 100 до 3500 циклов перезарядки. Ni – Cd аккумуляторы легко переносят быструю высокотоковую импульсную зарядку и медленную разрядку с умеренными величинами токов.

Для аккумуляторов этого типа необходим периодический полный разряд. В отсутствие такового в течение длительного времени чревато образованием на электродах крупных кристаллов, снижающих ёмкость. Проявляется, так называемый, эффект «памяти».

По сравнению с аккумуляторами других типов Ni – Cd аккумуляторы имеют ряд преимуществ: возможность быстрой зарядки даже после длительного бездействия (полного разряда); достаточно большое количество циклов (более 1000); возможность эксплуатации при низких температурах; длительные сроки хранения в полностью разряженном состоянии; относительно низкая стоимость. К недостаткам этих химических источников тока можно отнести наличие эффекта «памяти» и токсичность используемых материалов.

Никель – металлгидридные аккумуляторы в качестве анода используют водородный металлгидридный электрод, как правило, изготавливаемый из гидрид никель-лантана или никель-лития, электролитом является гидроксид калия, а катодом – оксид никеля.

Устройства типа Ni – MH начали разрабатываться в семидесятых годах прошлого столетия с целью устранения недостатков Ni – Cd устройств, однако, используемые в то время технологии не позволили создать стабильные металл – гидридные соединения. Только в 80 годы такие соединения появились.

Положительной характеристикой Ni – MH аккумуляторов является способность генерировать заданную величину ЭДС до состояния, практически полного разряда. Аккумуляторы этого типа при прочих равных условиях имеют на 30 % большую ёмкость и гораздо лучшие экологические показатели, без особых затрат утилизируются на нейтральные компоненты.

Литий – ионные (Li – ion) и литий – полимерные аккумуляторы (Li – pol) начали выпускаться сравнительно недавно, хотя принцип действия известен с 1912 г. Однако первые варианты устройств были не безопасны, литий он и в Африке – литий, весьма химически активен и склонен взрываться и возгораться.

Первые литиевые аккумуляторы в мобильных телефонах китайского производства, поставленные в Японию в 1991 г. недопустимо часто взрывались и горели. По энергетическим возможностям Li – ion аккумуляторы в два раза превосходят Ni – Cd элементы, что собственно и послужило поводом для дальнейшего совершенства. В настоящее время во многих конструкциях использовался сухой полимерный непроводящий электролит, но с высокой ионной проводимостью. Li – ion аккумуляторы технологичны в изготовлении и не в пример остальным малогабаритны. Отсутствие жидкого или пастообразного электролита делает эти аккумуляторы более безопасными.

Li – pol сухие аккумуляторы при всех своих эксплуатационных достоинствах, высокая ёмкость, экологическая безопасность, долговечность (более 1000 полных циклов перезарядки) плохо переносят температуры ниже комнатных. Хотя работы по совершенствованию этих химических источников тока продолжается, и каждый год на рынке появляются аккумуляторы с расширенными температурными диапазонами и улучшенными энергетическими показателями.

2. Магнитные явления

2.1. Магнитное поле движущихся зарядов

Рассматривая в предыдущем разделе проявление электрического тока, было отмечено, что наряду тепловыми и химическими эффектами, электрический ток обозначает своё присутствие возникновением и магнитных явлений.

Перечисленные признаки не равноценны. Так, например, химические превращения напрочь отсутствуют в проводниках, имеющих широкое практическое применение. При низких температурах в тех же проводниках тепловое проявление тока весьма нивелировано. А вот магнитные эффекты сохраняются при любых обстоятельствах, потому что магнитное поле является неперенным условием существования любой системы движущихся электрических зарядов.

Для распространения магнитного поля, впрочем, так же как и для электрического, не требуется присутствия, какой бы-то ни было среды. Магнитное поле может существовать в пустом пространстве.

Определение сущности магнитного поля принято делать на основе обсуждения его отличительных особенностей от обычного пространства.

На первых порах такие отличия были замечены благодаря своеобразному расположению стальных опилок, насыпанных вблизи проводников, по которым пропускали электрический ток. На рис. 2.1, 2.2 показаны возникающие линии магнитного поля вблизи проводников различной формы.

Линии магнитного поля прямолинейного проводника образуют концентрические окружности. При расположении двух и более витков рядом, поля каждого из витков накладываются друг на друга, при этом можно считать, что каждый виток присоединён к источнику тока.

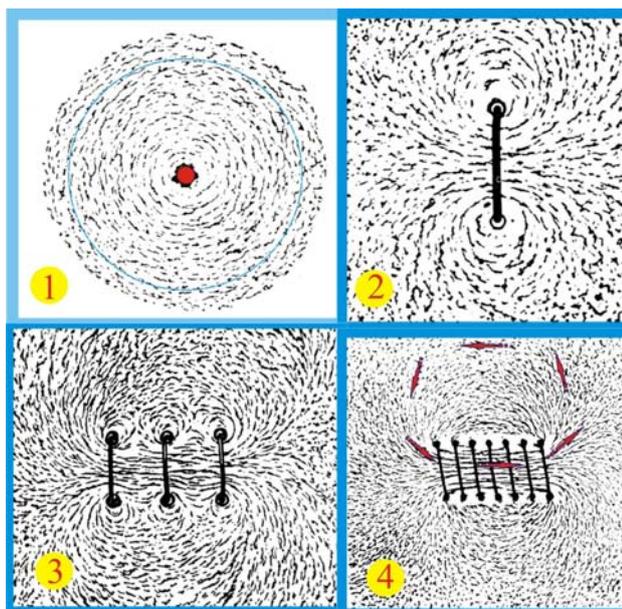


Рис. 2.1. Магнитное поле: 1 – прямолинейного проводника; 2 – витка с током; 3 – трёх витков с током; 4 – катушки с током

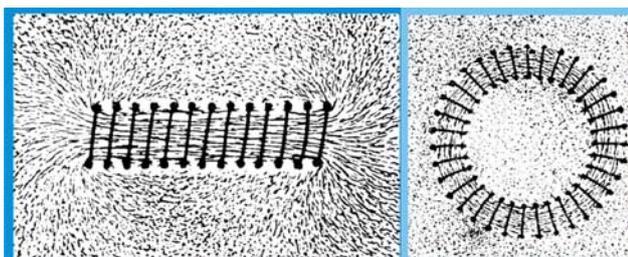


Рис. 2.2. Магнитное поле соленоидов и тороида

В ходе экспериментов было обнаружено, что неподвижный электрический заряд не взаимодействует с магнитным полем. Между ними не проявляются силы притяжения и отталкивания, однако, если заряд или магнит привести в движение, то между ними тот час же появится сила взаимодействия, стремящаяся вращать их.

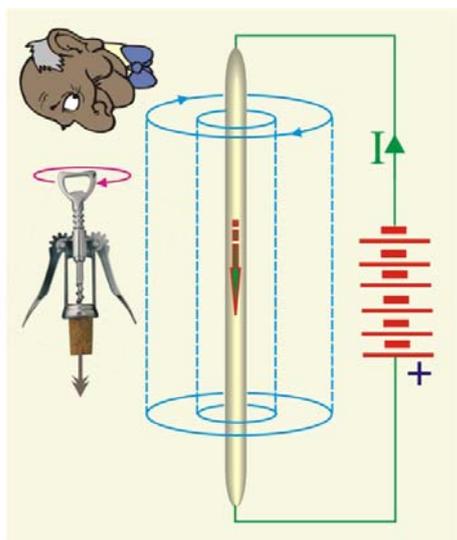


Рис. 2.3. Правило определения направления магнитного поля

Сила взаимодействия зависит от относительной скорости перемещения и взаимного направления движения. Вокруг движущихся зарядов возникают замкнутые силовые линии, по отношению к которым векторы возникающих магнитных сил будут направлены по касательной.

Концентрические силовые линии будут охватывать всю траекторию движущихся зарядов, о чём свидетельствует картина расположения стальных опилок вокруг прямолинейного проводника с током (рис. 2.1). Картина силовых линий показывает, что линии действия магнитных сил лежат в плоскости перпендикулярной направлению течения тока. Направление магнитного поля принято определять по правилу буравчика (рис. 2.3).

Если поступательное направление винта совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения головки винта или штопора будет соответствовать направлению линий магнитного поля. Можно воспользоваться и другим правилом. Если смотреть по направлению тока, то магнитные линии будут направлены в сторону движения часовой стрелки.

Следует особо отметить отличие движений исследуемых в рамках электродинамики от механических перемещений. Механическое движение характеризует изменение взаимного положения тел относительно друг друга или относительно выбранной системы отсчёта.

Электрический ток сопряжён с перемещением носителей заряда, однако явление возникновения тока не может быть сведено к одним только перемещениям носителей. Дело в том, что заряженные частицы перемещаются вместе с собственным электрическим полем, а движение электрического поля, в свою очередь инициирует возникновения поля магнитного.

В этой связи по своей сущности электрический ток сопряжён с магнитным полем. Напряжённость этого поля в любой точке пространства пропорциональна силе тока. Устоялось мнение, что магнитное поле не может быть получено отдельно и независимо от электрического тока.

Магнитные поля намагниченных тел, например, природные магниты, тоже имеют таковые свойства вследствие особенностей их внутриатомных токов. Возникновение магнитных полей не связано с физическими характеристиками проводника, а определяется исключительно силой текущего по ним тока.

С позиций магнетизма, термин «сила тока» не совсем адекватен обстоятельствам. Величина тока (это более конкретное определение) на самом деле можно рассматривать как быстроту переноса количества заряда, так и математически определён ток. С другой стороны величина тока однозначно определяет магнитное поле тока, т.е. синтезирует в себе сложную картину действительных перемещений заряженных частиц.

На основании обобщения многочисленных экспериментальных фактов был получен закон, определяющий количественно величину силы (силы Лоренца), действующей на заряд, движущийся в магнитном поле

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}),$$

где q – электрический заряд, \vec{v} – вектор скорости заряда, \vec{B} – вектор магнитной индукции, физический смысл которого будет определён ниже. Уравнение силы Лоренца можно записать в скалярной форме

$$F_L = qvB \sin(\vec{v}; \vec{B}).$$

Определим размерность магнитной индукции, разрешив уравнение силы Лоренца относительно B

$$B = \frac{F_L}{qv}, \quad [B] = \frac{1\text{Н} \cdot 1\text{с}}{1\text{Кл} \cdot 1\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \text{Тл}.$$

Единица индукции магнитного поля именуется теслом. Тесла достаточно большая величина, в лабораторных условиях путём специальных усилий удаётся получать магнитные поля с $B \cong 8 - 10$ Тл, хотя в природе существуют поля и с гораздо большей величиной индукции.

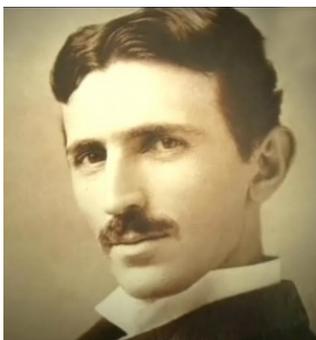


Рис. 2.4. Никола Тесла

Никола Тесла родился в 1856 году в той стране, которая до недавнего времени называлась Югославией, а теперь это – Хорватия. Ходили упорные слухи что, Тесла был ясновидцем и обладал различными паранормальными способностями.

Более всего в реальном мире он прославился в молодые годы, когда создал генератор переменного тока и тем предоставил человечеству возможность широкого использования электричества. В своём изобретении он преломил все самые передовые идеи электродинамики.

На определённом этапе творческой биографии судьба свела талантливого учёного и изобретателя с Эдисоном, тем самым, который прославился многими изобретениями. Однако творческий союз не сложился.

Занимаясь промышленной электроэнергетикой, Эдисон основную ставку делал на постоянный ток, в то время как юному славянину было очевидно, что будущее за переменным током, что собственно мы теперь и наблюдаем.

В конце концов, Эдисон, выражаясь современным сленгом, «кинул» Тесла. Поручив ему изобрести электрический генератор переменного тока, пообещал в случае успеха 50 тысяч долларов в качестве вознаграждения. Генератор был создан, но вознаграждения не последовало.

Причём Эдисон сослался на отсутствие у Тесла чувства «американского юмора». Кроме того, Эдисон, опираясь на свой авторитет, пропагандировал огромный вред переменного тока на здоровье людей. Вот такой сказочник был это Эдисон. В подтверждение своих опасений он публично умертвил собаку переменным током. Хотя постоянным током такого эффекта можно было достичь запросто.

Следует отметить, что сам Тесла давал поводы к настороженному отношению к себе, в частности он утверждал, что некая инопланетная цивилизация поддерживает с ним связь, посылая ему сообщения во время восхода марса над горизонтом.

Кроме того, Тесла утверждал, что располагает устройствами, с помощью которых можно достаточно быстро изменять возраст человека. Не смотря на безусловно спорные, с позиций современной науки, некоторые утверждения Тесла, он был крупным специалистом в области электродинамики, опередившим своё время.

Можно видеть, что сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости движения частицы, т.е. она не совершает работы, что говорит о неизменности кинетической энергии частицы при её движении. Сила Лоренца меняет лишь направление вектора скорости, сообщая частице нормальное ускорение.

При движении частицы в комбинации электрического и магнитного полей, с их стороны будет проявляться суммарная сила в виде силы Кулона и силы Лоренца

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) = q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})].$$

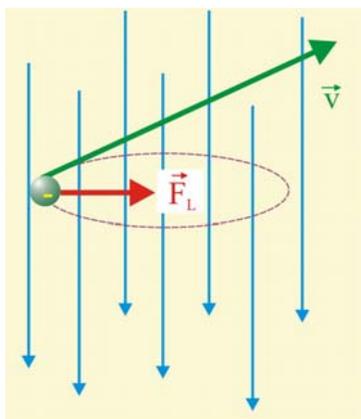


Рис. 2.5. Движение электрона в однородном магнитном поле

Рассмотри более подробно некоторые механические аспекты движения заряженной частицы в магнитном поле.

Пусть электрон с зарядом e влетает в магнитное поле (рис. 2.5) перпендикулярно вектору индукции, т.е. $\vec{v} \perp \vec{B}$, что приведет, в конечном счете, к движению по окружности фиксированного радиуса R . В этом случае

$$F_L = evB, \quad \sin(\vec{v}; \vec{B}) = 1.$$

Для случая такого движения электрона, каковой станет находиться на стационарной круговой орбите, можно записать второй закон Ньютона исходя из равенства модулей силы Лоренца и силы, вызванной нормальным ускорением частицы

$$\frac{m_e v^2}{R} = evB.$$

Угловое ускорение, при этом будет равно

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{eB}{m_e}.$$

Период обращения электрона определится как

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m_e}{eB}.$$

В случае движения электрона вдоль линий индукции сила Лоренца будет равна нулю, т.к. $\sin(\vec{v}; \vec{B}) = 0$, т.е. движение будет прямолинейным и равномерным.

Поле покоящегося в вакууме или воздухе электрического точечного заряда, как известно, определяется уравнением

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}.$$

Попытаемся методами теории размерностей модифицировать последнее уравнение применительно к индукции магнитного поля, для чего заменим скалярную величину заряда q на вектор $q\vec{v}$

$$\vec{B} \sim \frac{q(\vec{v} \times \vec{r})}{4\pi\epsilon_0 e^3}.$$

Чтобы размерности правой и левой части уравнения совпадали, необходимо правую часть разделить на квадрат некой скорости, в качестве которой логично использовать квадрат скорости света – c^2

$$\vec{B} = \frac{q(\vec{v} \times \vec{r})}{4\pi c^2 \epsilon_0 r^3}.$$

Введём новую размерную постоянную величину μ_0 , которую называют магнитной постоянной, она в системе СИ выполняет ту же роль, что и ϵ_0 в электростатических формулах, т.е. совмещает магнитные единицы с механическими величинами

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} .$$

$$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \cong \frac{1}{9 \cdot 10^{-12} \cdot 9 \cdot 10^{16}} \cong 12,56 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} \cong 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} .$$

Перепишем уравнение вектора магнитной индукции с учётом полученных соотношений

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q (\vec{v} \times \vec{r})}{4\pi r^3} .$$

Это уравнение нельзя рассматривать, как полученное на безусловной теоретической основе, во многом оно носит интуитивный характер, однако с его помощью можно получить вполне подтверждаемые экспериментом результаты.

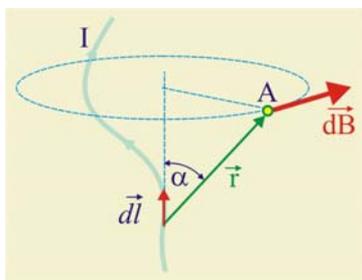


Рис. 2.6. Магнитное поле элемента тока

Рассмотрим проводник произвольной формы к которому течёт постоянный ток величиной I . Выделим прямолинейный участок проводника элементарной длиной $d\vec{\ell}$ (рис.2.6). За время dt через этот участок протекает электрический заряд величиной

$$q = e \cdot n_e \cdot s \cdot d\ell ,$$

где n_e – концентрация электронов, s – поперечное сечение проводника, e – заряд электрона.

Подставим уравнение заряда в уравнение маг-

нитной индукции

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{en_e s d\ell (\vec{v} \times \vec{r})}{r^3} .$$

Величину тока в проводнике можно представить следующим образом

$$I = en_e s v ,$$

что даёт основания записать уравнение в виде

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell (\vec{d\ell} \times \vec{r})}{r^3} ,$$

Модуль элементарного вектора индукции определится, при этом, как

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \sin(\vec{d\ell} \times \vec{r})}{r^2} .$$

Полученное уравнение совпало с экспериментами Био и Савара, которое было сформулировано в виде закона Лапласом. Этот закон, **закон Био – Савара – Лапласа** определяет величину магнитной индукции в любой точке поля, создаваемого током постоянной величины, протекающим через проводник.

Применительно к вектору магнитной индукции справедлив принцип суперпозиции, т.е. сложения элементарных индукций от различных участков проводника заданной длины. Покажем применение закона на проводниках различной формы.

Качественная картина магнитного поля в окрестностях прямолинейного проводника приведена на рис. 2.1, 2.3, сделаем количественные оценки магнитного поля. Выберем в окрестностях проводника (рис. 2.7) произвольную точку A в которой будем определять посредством закона Био – Савара – Лапласа напряжённость $d\vec{B}$ от элемента $d\vec{\ell}$

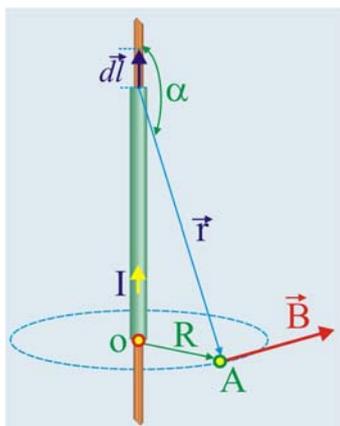


Рис. 2.7. Прямолинейный проводник с током

$$dB = \frac{\mu_0 I \sin \alpha dl}{4\pi r^2}.$$

Если всю длину проводника разбить на бесконечное множество элементарных участков, то обнаружится, что направление векторов элементарных индукций будет совпадать с направлением касательных к окружностям, проведенным в соответствующих точках пространства, в плоскостях, ортогональных проводнику.

Это даёт основание для получения суммарного значения индукции проинтегрировать уравнение dB

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \alpha dl}{r^2}.$$

Выразим значение r и $\sin \alpha$ через переменную величину l

$$r = \sqrt{R^2 + l^2},$$

$$\sin \alpha = \frac{R}{\sqrt{R^2 + l^2}}.$$

Подставим полученные значения r и $\sin \alpha$ в подынтегральное выражение

$$B = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dl}{\sqrt{(R^2 + l^2)^3}},$$

$$B = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \frac{l}{R^2 \sqrt{R^2 + l^2}} \Big|_{l=-\infty}^{l=\infty} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

Существенно отметить, что полученное уравнение сходно с уравнением напряжённости электрического поля заряженного проводника

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R}.$$

Кроме того, вектор напряжённости электрического поля направлен радиально, т.е он перпендикулярен вектору индукции в одноимённой точке.

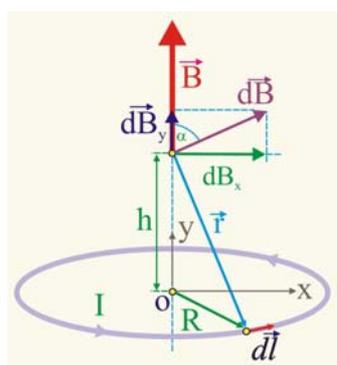


Рис. 2.8. Поле кругового тока

Картина расположения линий магнитной индукции витка с током приведена на рис. 2.8. Получим количественную оценку этого поля, используя методику прежнего подраздела. Напряжённость магнитного поля, создаваемого элементом проводника dl в выбранной произвольной оси кругового тока определится как

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2},$$

в данном случае $\alpha = \pi/2$, следовательно, $\sin \alpha = 1$. Если вектор элементарной индукции \vec{dB} представить в виде двух составляющих dB_x и dB_y , то сумма

всех горизонтальных составляющих будет равна нулю, другими словами, для решения поставленной задачи необходимо просуммировать вертикальные составляющие dB_y

$$B = \oint dB_y.$$

$$dB_y = dB \cos \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{\sqrt{R^2 + h^2}} d\ell,$$

Перед интегрированием уравнения необходимо учесть, что

$$\oint d\ell = 2\pi R.$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{\sqrt{(R^2 + h^2)^3}} = \frac{\mu_0 I}{2R} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{h^2}{R^2}\right)^3}}.$$

Очевидно, что в центре витка, где $h = 0$

$$B_{h=0} = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

При большом удалении от плоскости витка $h \gg R$, т.е.

$$B_{h \rightarrow \infty} \cong \frac{\mu_0 I R^3}{2R h^3} \cong \frac{\mu_0 I (\pi R^2)}{2\pi h^3}.$$

Произведение величины тока на площадь витка называется магнитным моментом

$$P_m = I \cdot 2\pi R^2.$$

Перепишем уравнение индукции с учётом значения магнитного момента

$$\vec{B}_{h \rightarrow \infty} \cong \frac{\mu_0 \vec{P}_m}{2\pi h^3}.$$

Рассмотрим применение обсуждаемого закона к длинным прямолинейным катушкам, соленоидам. **Соленоид** представляет собой цилиндрическую катушку с большим числом витков N , образующих в пространстве винтовую линию.

При достаточно плотном расположении витков друг к другу соленоид можно представить как совокупность большого числа круговых токов (рис. 2.9), что даёт основание полагать однородность поля во внутреннем пространстве.

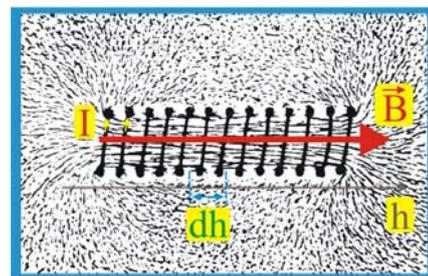


Рис. 2.9. Магнитное поле соленоида

Оценим количественно магнитное поле внутри соленоида, для чего запишем уравнение закона Био – Савара – Лапласа применительно к элементу соленоида длиной dh

$$dB = N \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{\sqrt{(R^2 + h^2)^3}} dh.$$

Проинтегрируем уравнение по всей длине соленоида h

$$B = \frac{N\mu_0 I R^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dh}{\sqrt{(R^2 + h^2)^3}} = \frac{N\mu_0 I R^2}{2} \cdot \frac{h}{R^2 \sqrt{(R^2 + h^2)}} \Bigg|_{h=-\infty}^{h=\infty}.$$

Если соленоид считать бесконечно длинным, то уравнение упростится

$$B = \mu_0 N I.$$

Ампер и его многочисленные последователи опытным путём установили, что на проводники с током (на движущиеся носители заряда) действуют механические силы, вызванные наличием магнитного поля.

Это действие можно описать количественно. Если поперечное сечение проводника S , а его длина в направлении тока l , то электрический заряд, сосредоточен-

ный в элементарном объёме $dV = Sdl$, будет определяться количеством сосредоточенных в нём носителей заряда, в частности – электронов

$$dN = ndV = nSd\ell,$$

суммарный электрический заряд которых определится как

$$dQ = qdN = qnSd\ell,$$

где q – заряд носителя, n – концентрация носителей. Силу, действующую на кристаллической решётки в рассматриваемом элементе проводника, можно определить из условий равновесия электрических и магнитных сил

$$quB = qE, \Rightarrow E = Bu.$$

Выразим дрейфовую скорость носителей заряда через плотность тока, текущего по проводнику

$$u = \frac{j}{qn}, \quad E = \frac{Bj}{qn}.$$

Искомую элементарную силу, таким образом можно представить следующим образом

$$dF_A = EdQ = \frac{B}{qn} j \cdot qnSd\ell = IBd\ell.$$

В векторной форме сила, действующая на элементарную длину проводника $d\vec{\ell}$, по которому течёт ток величиной I , определится векторным соотношением

$$d\vec{F}_A = I(d\vec{\ell} \times \vec{B}).$$

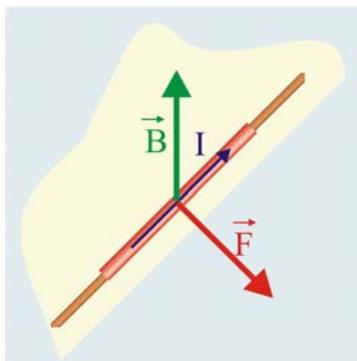


Рис. 2.10. Действие магнитного поля на проводник с током

В случае прямолинейного проводника магнитная индукция во всех точках пространства вдоль всей его длины l магнитная индукция будет постоянной, т.е.

$$\vec{F}_A = I(\vec{\ell} \times \vec{B}),$$

или, в соответствии с определением векторного произведения

$$F_A = I\ell B \sin(\vec{\ell} \times \vec{B}).$$

Очевидно, что вектор действующей силы будет перпендикулярен плоскости, в которой располагаются векторы $\vec{\ell}$ и \vec{B} (рис. 2.10). Уравнение F_A является математическим выражением **закона Ампера**.

Закон Ампера применим для вычисления взаимодействия двух проводников с током.

Пусть по двум длинным прямолинейным проводникам (рис. 2.11) протекают в одном направлении токи величиной I_1 и I_2 . Проводник с током I_1 в области расположения другого проводника создаёт магнитное поле с индукцией

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b}.$$

При этом, элемент второго проводника на своей длине Δl будет испытывать силу величиной

$$F_{2,1} = B_1 I_2 \Delta\ell.$$

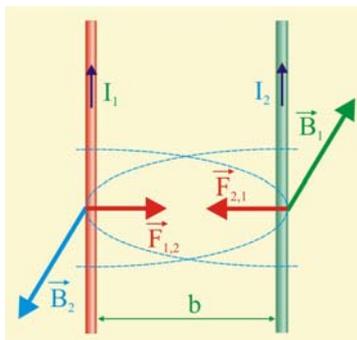


Рис. 2.11. Взаимодействие двух проводников с током

Совмещая два последних уравнения, получим

$$F_{2,1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} \Delta\ell.$$

2.2. Электромагнитная индукция

Майкл Фарадей, ознакомившись с работами Ампера и его последователей, пришёл к идее обратимости процессов при взаимодействии магнитного поля и электрического тока.

В 1831 г. он увлёкся идеей получения электрического тока посредством магнитного поля. Первые эксперименты были просты и оригинальны. На стальной сердечник c (рис. 2.12) были намотаны две катушки L_1 и L_2 , причём первая катушка была подключена к источнику тока ε .

В цепь второй катушки был включён гальванометр. Фарадей менял материал проводников, их форму, количество витков, однако гальванометр перемещение электрических зарядов не фиксировал. Многочисленные изменения конструкции не принесли результатов.

В один из дней лабораторных испытаний ассистент Фарадея заметил, что стрелка гальванометра ощутимо дернулась при выключении установки переключателем k . Подключая и отключая катушку L_1 к источнику тока, экспериментаторы обнаружили броски стрелки. Стало ясно, что во втором контуре, замкнутом на гальванометр ЭДС возникает только в моменты времени, когда магнитная индукция исходного поля либо возрастает, либо уменьшается.

Проверка обнаруженной закономерности была проверена при вдвигании и выдвигании постоянного магнита внутрь многovitковой катушки, замкнутой на гальванометр (рис. 2.13). Перемещение магнита сопровождалось возбуждением тока в катушке, который получил название индукционного.

Зафиксированные экспериментально факты индуцирования ЭДС Фарадей объяснил исходя из следующих предпосылок.

Если магнитное поле изображать посредством линий индукции, то одной из характеристик будет густота линий.

Пусть некоторый замкнутый контур, для простоты изображения круговой (рис. 2.14), движется в магнитном поле, переходя в пространство с большей густотой линий магнитной индукции.

Как было показано ранее, магнитное поле имеет вихревой характер, т.е. линии магнитной индукции замкнуты, они не имеют начал и концов. Линии индукции сцеплены с контуром, поэтому пересечение этих линий должно сопровождаться пересечением плоскости контура этих линий.

Если проводник находится в покое, то переменный характер должно иметь магнитное поле. В этой связи Фарадей заключил, что **индукционный ток возникает**

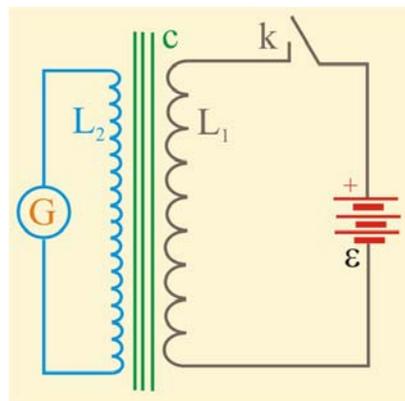


Рис. 2.12. Опыт М. Фарадея

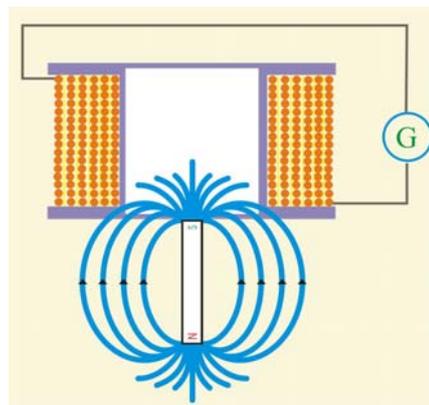


Рис. 2.13. Взаимодействие магнита с катушкой

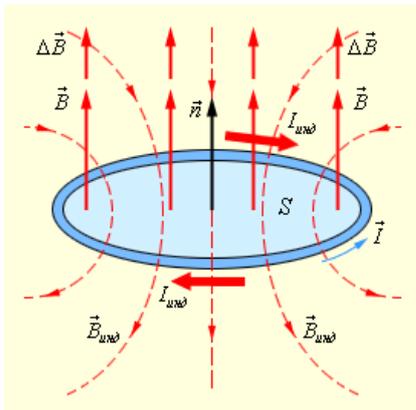


Рис. 2.14. Замкнутый контур в магнитном поле

в проводнике только в том случае, если проводник или какая либо его часть пересекает линии магнитной индукции.

Эмилий Христофорович Ленц применяя к явлению электромагнитной индукции закон сохранения энергии сформулировал следующее правило в соответствии с которым возникающий в проводнике индукционный ток $I_{\text{инд}}$ приводит к возникновению магнитного поля $\vec{B}_{\text{инд}}$, направленного в противоположную сторону исходному полю.

Другими словами, **индукционный ток во всех случаях направлен таким образом, что его действие противоположно действию при-**

чины, вызвавшей этот ток.

Правило (закон) Ленца применимо к случаям, когда проводник неподвижен, а изменяется внешнее магнитное поле. Правило Ленца подтверждает лишний раз справедливость закона сохранения энергии.

Если предположить, что вторичное индуцированное поле имело бы направление совпадающее с исходным полем, то не существовало бы причин неограниченного возрастания индукционного тока во время всех изменений исходного поля. А на самом деле такового не наблюдается.

Возникновение индукционных токов сопровождается совершением дополнительной работы внешними силами, а силы, вызванные индукционным током, препятствуют движению.

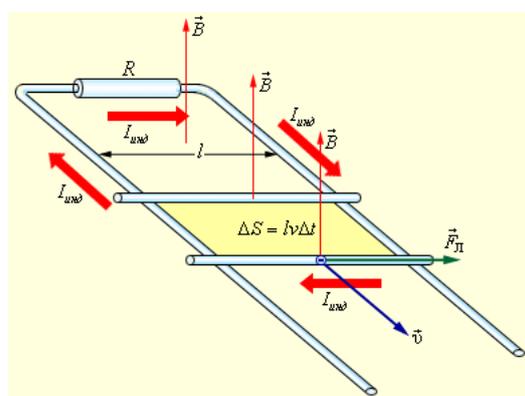


Рис. 2.15. Возникновение ЭДС индукции

Пусть прямолинейный проводник длиной l перемещается с постоянной скоростью \vec{v} в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} (рис. 2.15). За время Δt проводник перемещается пересекая поле на площади

$$\Delta S = \ell v \Delta t ,$$

при этом изменение магнитного потока составляет

$$\Delta \Phi_m = B \Delta S .$$

Рассмотрим бесконечно малое перемещение проводника за время dt , когда магнитный поток изменяется на величину $d\Phi_m$, при этом будет совершаться работа, величина которой с учётом правила Ленца запишется следующим образом

$$\delta A = -I_{\text{инд}} d\Phi_m .$$

Поскольку в уравнение работы входит величина индукционного тока, то очевидно, что она связана с перемещением носителей зарядов. Движение зарядов может возникать только при возникновении внутри проводника электрического поля.

Для рассматриваемого случая справедливо соотношение

$$\varepsilon_i I_{\text{инд}} dt = -I_{\text{инд}} d\Phi_m .$$

Разделим уравнение на $I_{\text{инд}} dt$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Уравнение представляет собой математическое выражение **закона электромагнитной индукции Майкла Фарадея**.

Как было установлено выше, явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях изменения магнитного потока через контур. В частности ЭДС индукции может генерироваться в самом контуре при изменении в нём величины тока, что приводит к появлению дополнительных токов. Это явление получило название самоиндукции, а дополнительно возникающие токи называются экстратаками или токами самоиндукции.

Исследовать явление самоиндукции можно на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 2.16.

Катушка L с большим числом витков, через реостат r и переключатель k подсоединяются к источнику ЭДС ε .

Дополнительно к катушке подключён гальванометр G . При замкнутом переключателе в точке A ток будет ветвиться, причём ток величиной i будет протекать через катушку, а ток i_1 через гальванометр. Если затем переключатель разомкнуть, то при исчезновении в катушке магнитного потока возникнет экстраток замыкания I .

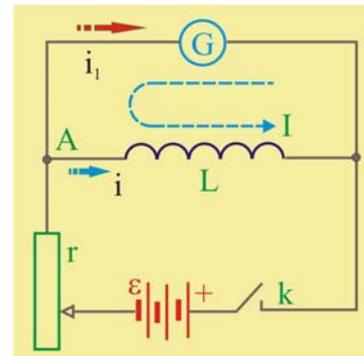


Рис. 2.16. Самоиндукция

По закону Ленца экстраток будет препятствовать уменьшению магнитного потока, т.е. будет направлен в сторону убывающего тока, а вот через гальванометр экстраток пройдёт в направлении противоположном первоначальному, что приведёт к броску стрелки гальванометра в обратном направлении.

Если катушку снабдить железным сердечником, то величина экстратока увеличивается. Вместо гальванометра в этом случае можно включить лампочку накаливания, при возникновении тока самоиндукции лампочка будет ярко вспыхивать.

Известно, что магнитный поток, сцепленный с катушкой пропорционален величине протекающего по ней тока

$$\psi = Li,$$

коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура. Размерность индуктивности определяется уравнением

$$L = \frac{d\psi}{i}, \quad [L] = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \text{Гн (генри)}.$$

Получим уравнение ЭДС самоиндукции ε_{si} для катушки

$$\varepsilon_{si} = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -\left(L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{dt}i\right).$$

В общем случае индуктивность, наряду с геометрией катушки в средах может зависеть от силы тока, т.е. $L = f(i)$, это можно учесть при дифференцировании

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{di} \frac{di}{dt}.$$

ЭДС самоиндукции представится следующим уравнением

$$\varepsilon_{si} = -\left(L + \frac{dL}{di}\right) \frac{di}{dt}.$$

Если индуктивность не зависит от величины тока, уравнение упрощается

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{di}{dt}.$$

Анализ полученных уравнений показывает, что **ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения величины тока.**

Для получения энергетических характеристик магнитного поля в явном виде уместно провести некоторые аналогии с механикой.

Напомним, что в механике наличие сил, как правило, свидетельствует о возможности совершения работы, которая количественно эквивалентна изменению энергетического состояния рассматриваемой системы.

При рассмотрении особенностей взаимодействия магнитного поля с проводниками тоже обнаружили силы, способные совершать работу, из чего следует, что магнитное поле обладает энергией. Возвратимся к уравнению ЭДС индукции. Умножим правую и левую его часть на произведение idt

$$\varepsilon idt = i^2 R dt + i L di.$$

Левая часть уравнения характеризует работу, производимую источником тока за время dt . Первое слагаемое правой части уравнения $i^2 R dt$ тоже выражает работу, трансформируемую в нагревание проводника, естественно, что по правилам размерности, второе слагаемое $L di$ тоже должно иметь размерность работы или энергии, т.е. измеряться в джоулях.

Действительно, величина $L di$ количественно **характеризует работу**, производимую источником тока против ЭДС самоиндукции, о чём свидетельствует наличие в этом произведении индуктивности катушки.

Очевидно предположить, что совершаемую против ЭДС самоиндукции работу можно рассматривать как электромагнитную энергию, концентрируемую в катушке. Если ток в цепи возрастает от нуля до некоторого значения I , то полная энергия накапливаемая магнитным полем за время dt определится в виде интеграла

$$W_m = L \int_0^I i di = \frac{LI^2}{2}.$$

Уравнение по структуре и физическому смыслу удивительным образом напоминает уравнение энергии электрического поля в конденсаторе

$$W_e = \frac{CU^2}{2},$$

и уравнение кинетической энергии из механики, что тоже не является случайным.

Обратим внимание на тот факт, что все перечисленные виды энергий **пропорциональны квадрату величины**, определяющей содержание и развитие процесса: величина электрического тока, разность электрических потенциалов и скорость.

2.3. Электродинамика Максвелла – Герца – Хевисайда

Все факты проявления электрических и магнитных полей можно обобщить в виде нескольких показанных ранее утверждений.

Утверждение 1. Статическое электрическое поле создаётся электрическими зарядами, причём силовые линии электрического поля начинаются и заканчиваются на электрических зарядах. Этому утверждению соответствует теорема Остроградского – Гаусса

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

где $d\vec{S}$ – трансформированная в вектор элементарная площадь, путём её умножения скалярно на единичный вектор внешней нормали, т.е. $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$, ρ – объёмная плотность зарядов. Левая часть уравнения представляет собой поток вектора напряжённости электрического поля через произвольную замкнутую поверхность S , ограничивающая объём V .

Утверждение 2. В природе до настоящего времени не обнаружены изолированные магнитные заряды (монополи). Математическим содержанием этого утверждения так же является теорема Остроградского – Гаусса, правая часть которой равна нулю

$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Утверждение 3. Электростатическое поле потенциально, т.е. в нём нет замкнутых силовых линий, а работа поля по замкнутому перемещению всегда равна нулю. Не замкнутость силовых линий математически можно выразить посредством нулевой циркуляции поля по произвольному контуру

$$\oint_\ell \vec{E} d\vec{\ell} = 0.$$

Утверждение 4. Вихревое магнитное поле создаётся электрическими токами. Это утверждение математически выражается теоремой о циркуляции вектора индукции магнитного поля

$$\oint_\ell \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S},$$

где \vec{j} – вектор плотности тока. Нетрудно видеть, что четвертое утверждение, ко всему прочему, основано на законе Био – Савара – Лапласа.

Дополним эти утверждения выражением для комплексной силы Лоренца, которая действует на движущиеся заряды со стороны электрических и магнитных полей:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}).$$

Все четыре условия, по сути, были сформулированы без учёта особенностей, возникающих при явлении электромагнитной индукции. А суть вот в чём. Если

проводящий контур, например круговой, поместить в изменяющийся магнитный поток, то в нём возникает ЭДС индукции, что означает перемещение в нём электрических зарядов. Всякая ЭДС приводит к появлению сил, перемещающих по проводнику заряды. С другой стороны, перемещение зарядов свидетельствует о наличии электрического поля, причём циркуляция этого поля по периметру витка по определению и равна ЭДС индукции, т.е.

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = \varepsilon_i.$$

Как известно из математики, если циркуляция некоего векторного поля не равна нулю, то это поле не является потенциальным, а обладает вихревыми свойствами, подобно магнитному полю.

Интересно выяснить в этой связи роль проводящего контура. Контур в данном случае является своеобразным индикатором возникшего индукционного тока. Чтобы учесть изложенные выше новые обстоятельства, необходимо сформулированные выше утверждения дополнить законом электромагнитной индукции Майкла Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} d\vec{S} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Подставим далее значение ЭДС индукции из уравнения утверждения №1

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Последнее уравнение, содержащее закон электромагнитной индукции, даёт основание уточнить третье утверждение следующим образом.

Утверждение 3*. Изменение магнитного поля приводит к возникновению вихревого электрического поля.

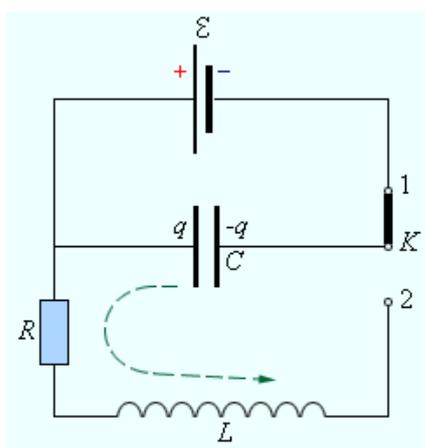


Рис. 2.17. Колебательный контур

Ещё одним примером необычного проявления свойства электрического поля является колебательный контур (рис. 2.17). Поставив переключатель в положение 1, зарядим конденсатор, а затем переключатель К переброшим в положение 2. Конденсатор начнёт разряжаться через сопротивление R и индуктивность L .

В образованном замкнутом контуре возникнет индукционный ток, причём конденсатор станет неоднократно перезаряжаться. В этом случае электрическая энергия, запасаемая в конденсаторе, будет неоднократно преобразовываться в энергию магнитного поля катушки.

ки.

Этот колебательный процесс, по большому счёту противоречит нашему четвёртому утверждению. Конденсатор, в простейшем варианте, представляющий собой две проводящие пластины, разделённые диэлектриком не предрасположен проводить электрический ток, тем не менее, ток всё же протекает, обеспечивая его перезарядку.

Впервые подобным процессом заинтересовался Максвелл, который задался целью модифицировать уравнение четвёртого утверждения применительно к рассматриваемым случаям.

Было экспериментально установлено и теоретически обосновано, что всякое переменное магнитное поле вызывает вихревое электрическое поле. Анализируя эти факты, Максвелл пришёл к выводу, что **возможен и обратный процесс, т.е. всякое изменение электрического поля должно вызывать появление вихревого магнитного поля.**

Это было сильное утверждение, потому что оно при дальнейшем экстраполировании приводило к довольно необычным выводам. Магнитное поле, как известно, является основным признаком всякого тока, из этого следовало, что переменное электрическое поле должно приводить к возникновению некоего тока.

Максвелл отождествил переменное электрическое поле с понятием «ток смещения», который не является следствием движения носителей зарядов. Термин во многом с исторической подоплёкой, потому что в некоторых средах, например в вакууме, вообще никаких зарядов нет, смещаться нечему, а вот в диэлектрических средах эффект смещения зарядов имеет место.

Разберёмся с этим необычным током на примере зарядки обычного конденсатора (рис. 2.18). Включим в цепь конденсатора и источника внешней ЭДС микроамперметр с центральным начальным положением стрелки для регистрации возникающего тока.

Контур, по большому счету разомкнут, потому что содержит конденсатор, постоянный ток, как известно, не пропускающий. При длительном подключении батареи к конденсатору микроамперметр тока не фиксирует, а в первые моменты включения конденсатор заряжается, в металлических проводниках возникает зарядный ток.

Если полюса батареи поменять местами, то конденсатор перезарядится и в процессе перезарядки снова возникнет ток, но уже обратного направления. Если конденсатор подключить к сети переменного тока с частотой $f = 50 \text{ с}^{-1}$, а микроамперметр заменить лапой накаливания, то она станет вспыхивать с частотой, равной $\nu = 100 \text{ с}^{-1}$, что человеческий глаз различить не сможет, и будет казаться, что лампочка просто горит.

Эти и подобные им эксперименты показывают, что переменный электрический ток, т.е. переменное электрическое поле, может прекрасно существовать и в незамкнутых контурах. Как совершенно гениально предположил Максвелл, токи проводимости в проводящем разомкнутом контуре замыкаются токами смещения в диэлектрике, при этом электрическое поле в конденсаторе в произвольный момент времени создаёт магнитное поле, такое же, как если бы пространство между обкладками было проводящим. Возникающее магнитное поле такое же, как и в проводнике, т.е. такое же, как и в замкнутом контуре.

Уравнения Максвелла записываются обычно в двух формах: **интегральной и дифференциальной форме.**

Интегральные уравнения выражают соотношения для проведенных мысленно в магнитном поле неподвижных контуров и поверхностей.

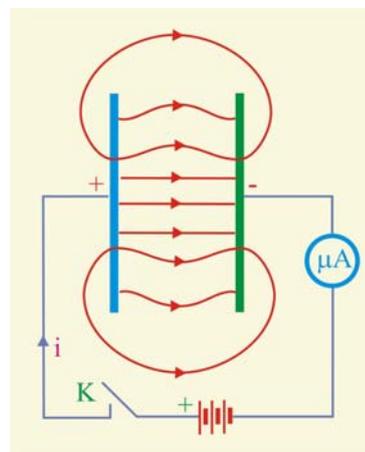


Рис. 2.18. Зарядка конденсатора

Дифференциальная форма уравнений устанавливает взаимосвязь между характеристиками поля и плотностями электрических зарядов и токов в каждой точке пространства занятого полем.

Уравнения в интегральной форме были, по сути, сформулированы выше, путём констатации экспериментально и теоретически очевидных фактов:

$$\left. \begin{aligned} \text{(I)} \quad \oint_S \vec{E} d\vec{S} &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV; \\ \text{(II)} \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0; \\ \text{(III)} \quad \oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \\ \text{(IV)} \quad \oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} &= \mu_0 \oint_S \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \end{aligned} \right\}$$

Первое уравнение системы не является абсолютно новым, в его основу положена теорема Остроградского – Гаусса для электрических полей в средах. Электрическое поле в диэлектрической среде, разумеется, создаётся зарядами двух типов: свободными и связанными.

Связанными называются заряды, входящие в состав структурных элементов вещества диэлектрика, т.е. молекул, атомов и ионов. Свободными считаются заряды, способные перемещаться под действием электрического поля на макроскопические расстояния, а так же избыточные заряды, сообщённые диэлектрику извне.

Электрическое поле в диэлектрике, таким образом, представляет собой суперпозицию двух полей, генерируемых связанными и свободными зарядами. Теорема Остроградского – Гаусса в этом случае записывается следующим образом

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (Q^{\text{своб}} + Q^{\text{связ}}).$$

Уместно напомнить, в этой связи, что уравнение теоремы учитывает только заряды, содержащиеся внутри мысленно проведенного контура, так сказать, только охваченные заряды. Поле связанных зарядов зависит от степени поляризации диэлектрика, т.е. от суммарного дипольного момента всех молекул, заключённых в рассматриваемом объёме ΔV , ограниченном поверхностью S

$$\vec{P}_m = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{i=N} \vec{p}_{mi}.$$

Напряжённость поля, создаваемого связанными зарядами, определится как

$$\vec{E}^{\text{связ}} = - \frac{1}{\epsilon_0} \oint_{S_{\text{в}}} \vec{p}_m d\vec{S}.$$

Знак минус характеризует факт уменьшения потенциальной энергии диполя при его повороте в электрическом поле. Уравнение позволяет выразить величину связанного заряда следующим образом

$$Q^{\text{связ}} = - \oint_S \vec{p}_m d\vec{S}.$$

Перепишем теорему Остроградского – Гаусса следующим образом

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon} \left(Q^{\text{своб}} - \oint_S \vec{p}_m d\vec{S} \right),$$

или

$$Q^{\text{своб}} = \varepsilon_0 \oint_S \vec{E} d\vec{s} + \oint_S \vec{p}_m d\vec{S}.$$

Поскольку интегралы берутся по одной и той же замкнутой поверхности, то их можно преобразовать к виду

$$Q^{\text{своб}} = \oint_S (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{p}_m) d\vec{S}.$$

Уравнение можно привести к обычной форме записи теоремы Остроградского – Гаусса, если ввести обозначение

$$(\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{p}_m) = \vec{D},$$

тогда

$$\oint_S \vec{D} d\vec{s} = Q^{\text{своб}}.$$

Таким образом, мы снова пришли к понятию вектора электрического смещения или, как его иногда называют, вектором электрической индукции. Уравнение определяет поток вектора смещения, пронизывающий поверхность S , т.е.

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{s} = Q^{\text{своб}}.$$

Если поверхность S неподвижна и недеформируемая, то изменение потока будет сопряжено с зависимостью вектора электрического смещения от времени. Продифференцируем по времени уравнение

$$\frac{dQ^{\text{своб}}}{dt} = \frac{d\Phi_D}{dt} = \frac{d}{dt} \oint_S \vec{D} d\vec{s},$$

или

$$\frac{dQ^{\text{своб}}}{dt} = \oint_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}.$$

Размерность левой части последнего уравнения [Кл/с], т.е. соответствует размерности силы тока. Естественно в этой связи предположить, что величина $[\partial \vec{D} / \partial t]$ должна иметь размерность $[A/m^2]$, т.е. плотности тока j . Другими словами, можно обоснованно ввести понятие плотности тока смещения.

Плотность тока смещения, таким образом, равна скорости изменения вектора смещения. Отметим, что подынтегральное выражение содержит в общем случае две переменных величины t и S , но в данном конкретном случае, площадь исследуемого контура полагается неизменной.

Проведенный анализ позволяет определить ток смещения в виде

$$i_c = \int_S \vec{j}_c d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Для чего же потребовалась Максвеллу гипотеза о токе смещения? В своей работе «Динамическая теория электромагнитного поля» он написал: «... В диэлектрике, находящемся под действием электродвижущей силы, мы можем представлять, что электричество в каждой молекуле так смещено, что одна сторона молекулы делается положительно наэлектризованной, а другая – отрицательно наэлектризованной, однако электричество остаётся полностью связанным с молекулами и не переходит от одной молекулы к другой. Эффект этого воздействия на всю массу диэлектрика выражается в общем смещении электричества в определённом направлении. Это смещение не вполне равноценно току, потому что когда оно достигает определённой степени, то остаётся неизменным, но оно есть начало тока»

и его изменения образуют токи в положительном или отрицательном направлении, сообразно тому, уменьшается или увеличивается смещение ...».

Введя понятие тока смещения, Максвелл совершенно не тривиально подошёл к понятию замкнутости электрических цепей. Как отмечалось ранее, возникновение постоянного электрического тока возможно только в замкнутой цепи, потому, что там понятие тока связывается с переносом зарядов. Иное дело в цепях переменного тока, по Максвеллу замкнутость цепи совсем не обязательно.

Так, например, при зарядке и разрядке конденсатора через сопротивление электрический ток силой i протекает по соединительным проводам, при этом вокруг них создаётся магнитное поле с индукцией \vec{B} .

В то время, как электрическое поле распадается, провода окружены кольцевыми линиями магнитной индукции. Соединительная цепь будет иметь магнитную «шубу», доходящую до пластин. Пространство между пластинами заполнено всегда диэлектрическим веществом, которое, как известно ток не проводит в виду малого количества свободных зарядов, способных к перемещению под действием электрического поля.

Джеймс Клерк Максвелл взял на себя смелость утверждать, что «магнитная оболочка» не имеет концов, а образует полое кольцо из кольцевых линий магнитной индукции.

Ток смещения представляет собой, по сути, изменяющееся во времени электрическое поле в любой среде, вплоть до пустого пространства. В максвелловском представлении в природе существуют только замкнутые токи, причём это могут быть как токи проводимости, так и токи смещения. Электрические токи, исходя, из представлений Максвелла, не могут иметь начала и конца. **Там где заканчивается ток проводимости, неминуемо должен начинаться ток смещения.**

Второе уравнение. Максвелл записал это уравнение как факт отсутствия в природе уединённых магнитных зарядов. **Магнитный поток через замкнутую неподвижную поверхность, мысленно проведенную в электромагнитном поле равен нулю.**

Третье уравнение. Максвелл этим уравнением обобщил закон электромагнитной индукции Майкла Фарадея применительно к замкнутому неподвижному проводящему контуру, находящемуся в переменном магнитном поле. Проанализировав известное уравнение

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s},$$

Максвелл обратил внимание на то, что в него не входят параметры материала проводника. Он решил распространить это уравнение на любой контур, мысленно проведенный в переменном магнитном поле. Одной из особенностей третьего уравнения является то, что электрическое поле, в отличие от кулоновского полагается не потенциальным. Циркуляция вектора \vec{E} зависит от способа проведения контура в поле.

Главный же физический смысл третьего уравнения заключается в том, что оно устанавливает взаимосвязь переменного магнитного поля с индуцированным электрическим полем, причём наличие проводников совершенно не обязательно. Применительно к первому уравнению обычно приводят следующую смысловую формулировку: **«Циркуляция вектора напряжённости электрического поля \vec{E} по произвольному контуру, мысленно проведенному в электромагнитном поле,**

равна, взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока через поверхность S , натянутую на этот контур».

Четвёртое уравнение. С учётом тока смещения Максвелл записал закон полного тока следующим образом:

$$\oint_L \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} d\vec{l} = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = i_{\text{макро}} + i_c,$$

где $i_{\text{макро}}$ – макро ток, вызванный перемещением свободных носителей заряда под действием электрического поля, i_c – ток смещения, некоторые свойства которого оговорены выше. Это уравнение показывает, что циркуляция вектора напряжённости магнитного поля \vec{H} по произвольному неподвижному контуру L , мысленно проведенному в электрическом поле, равна алгебраической сумме макро тока и тока смещения сквозь поверхность, причём

$$i_{\text{макро}} = \oint_S \vec{j} d\vec{S},$$

где \vec{j} – плотность тока проводимости.

Уравнения Максвелла сыграли огромную роль не только в электродинамике, но и во всей современной физике. К окончанию XIX века уже было установлена непрерывность пространства, было ясно, что в каждой точке любая физическая величина имеет вполне определённое значение, причём переход от точки к точке носит непрерывный и плавный характер. Понятие эфира постепенно вытеснялся прагматичным понятием поля.

Образом поля в различных отделах физики, в принципе, начали пользоваться со второй половины XIX века. Например, при объяснении явлений электрического и магнитного свойства. Настоятельная необходимость введения понятия поля появилась после того, как датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777 – 1851 гг.), можно сказать, случайно в 1820 г., поместил магнитную стрелку около проводника с током и обнаружил, к своему великому удивлению, что стрелка перестала реагировать на магнитное поле Земли, а «переключилась» на проводник.

В этом же году Ампер разработал теорию связи электричества и магнетизма, используя понятие поля. В 1840 г. Майкл Фарадей в своих лекциях говорит о попытках «открыть прямую связь между светом и электричеством».

Такую связь Фарадей установил, наблюдая на опыте вращение плоскости поляризации в магнитном поле. Фарадей (1791 – 1867 гг.) на основе экспериментальных исследований сформулировал идеи поля как новой формы материи, введя понятие силовых линий.

Эстафету формирования законов электромагнитного поля продолжил Джеймс Клерк Максвелл, записав идеи Фарадея в виде записанных выше уравнений.

Революционное значение уравнений Максвелла состояло в том, что **они предсказывали существование электромагнитных волн**, которые были обнаружены опытным путём в 1888 г. Генрихом Герцем. Анализируя уравнения, Максвелл обнаружил, что взаимосвязанные изменения электрических и магнитных полей, в конечном счете, должны были приводить к появлению волны в абсолютно пустом пространстве.

Эта идея была настолько нетрадиционна, что противников у неё было гораздо больше, нежели сторонников, как среди учёных академического толка, так и среди инженеров. Дело в том, что понятие волн в то время обязательно связывалось с наличием среды, в которой волны распространяются.

Житейские наблюдения говорили о том же: волны на поверхности жидкости, волны на полях, засеянных злаками, упругие волны в газах, жидкостях и твёрдых телах и т.д.

Когда же со средой возникали трудности и недоразумения её, как отмечено выше, заполняли разного рода эфирами, обладающими свойствами, необходимыми для существования данной теории. А волна в пустом пространстве, помимо всех прочих странностей, ещё и не должна затухать, тут явно пахло нарушением законов сохранения в механическом их толковании.

Работая над своими уравнениями Максвелл не подозревал, что в Королевском научном обществе хранится с 1832 г. запечатанный конверт, который велено открыть и сделать достоянием общества через 106 лет (!?).

Текст послания, составленного загадочным Майклом Фарадеем и зачитанным только в 1938 г. потряс до возможного предела сдержанных английских учёных и их зарубежных коллег.

Фарадей завещал: « Я пришёл к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, окажется весьма незначительным. Я полагаю, что электромагнитная индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности. По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электромагнитной индукции. В настоящее время, насколько это мне известно, никто из учёных не имеет подобных взглядов».

Конверт был запечатан Майклом Фарадеем, когда Максвеллу был всего год от роду. Сейчас трудно представить себе причины, по которым Фарадей не опубликовал столь гениальную догадку.

Толи боязнь быть не понятым, а возможно осознание преждевременности своей идеи. Ясно одно, со сроками созревания научной мысли Фарадей явно просчитался. Потребовалось существенно менее 100 лет, чтобы удалось увидеть в электричестве и магнетизме объединяющее начало, и, как следствие этого, появление особого рода волн.

Несмотря на то, что мы постоянно упоминали Максвелла, приведенная нами форма записи уравнений принадлежит не ему. Практически все учебники повторяют уравнения, записанные Генрихом Герцем. Максвелл все свои теоретические взгляды на электромагнитные явления обобщил в виде системы из двадцати уравнений, а Герц, в процессе их осмысления, **воспользовавшись неопубликованными работами Оливера Хевисайда**, нашёл способ свести всю теорию всего к четырём уравнениям.



Рис. 2.19. Максвелл, Герц и Хевисайд

С позиций профессионалов, формально, полученная система уравнений достаточно проста, однако в процессе её применения открывался всё больший и больший их внутренний смысл.

Генрих Герц, которому выпала историческая роль доказательства справедливости уравнений в одной из своих публикаций записал:

«Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, будто математические формулы живут собственной жизнью, обладают собственным разумом – кажется, что эти формулы умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в своё время в них было заложено».

Работая в команде Гельмгольца, Герц имел все возможности проявить себя. К великому сожалению, судьба определила Герцу светлую голову и никудашнее здоровье. Он родился, как в прочем и многие гении (Ньютон, Кеплер, Декарт и др.) очень слабым. Врачи без оптимизма оценивали его дальнейшие перспективы пребывания на этом Свете. Болезни буквально преследовали Герца от самого рождения и до безвременной кончины в возрасте всего 37 лет.

Чтобы окончательно убедить себя в не возможности распространяться какой бы то ни было субстанции в пустоте, Гельмголец поручает Генриху Герцу спланировать и провести серию экспериментов. Начинающему двадцатилетнему учёному с ещё не окрепшими научными взглядами и представлениями была поручена миссия экспериментального опровержения юного выскочки.

Авторитет Гельмгольца был настолько велик, что у Герца по началу и в мыслях даже не было объективно во всём разобраться. Однако, чем больше Герц ставил экспериментов, тем радикальнее опровергалась теория дальногодействия и находила подтверждение там, где совпадала с представлениями англичанина.

А признавать универсальность максвелловской теории ой как не хотелось. Во-первых, потому что теория родом из Англии, которая, как известно для немцев совсем даже не указ. Во-вторых, если признать правоту Максвелла, то нужно было, мягко говоря, переоценить значимость великих немецких электродинамиков, таких как Нейман, Вебер, сам Геймголец и др.

Высказывание Герца о «самостоятельной жизни уравнений» начали подтверждаться сразу после первых попыток их применения. О самостоятельности уравнений говорили немногие учёные, в основном их поминали совсем недобрыми словами, ввиду непонимания многих, связанных с ними нюансов. Один из основных нюансов, который был особо неудобоварим авторитетами, был связан с наличием в уравнениях неких «загадочных констант» с неясным физическим смыслом.

Беспокойство классиков было оправданным. Дело в том, что появление в уравнениях физики новых постоянных величин, как правило, носило революционно-фундаментальный характер. Так произошло и на этот раз, константа оказалась более чем фундаментальной.

Выяснилось, что **в уравнениях «зашифрована» скорость света**, которая к моменту появления уравнений была уже измерена экспериментально. Дело в том, что комбинация достаточно хорошо известных постоянных величин, входящих в систему уравнений

$$\sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \cong \sqrt{\frac{1}{9 \cdot 10^{-12} \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} \cong 2,99874109 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

совпала с высокой степенью точности с измеренным значением скорости света. Совпадение было настолько разительным, что его трудно было отнести к случайному, если даже очень сильно захотеть.

До этого даже мысли ни у кого из учёных не возникало, что световые волны имеют какое-то отношение к электродинамике. Оптика, хоть и волновая, никак не связывалась с электромагнитными забавами Максвелла Герца и Хевисайда.

Проведя анализ уравнений с позиций закона сохранения энергии, Максвелл пришёл к совершенно фантастическому по тем временам выводу. **Уравнения не удовлетворяли закону сохранения энергии.**

Процесс преобразования переменного электрического поля в магнитное поле должен сопровождаться образованием волн, которые и уносят часть энергии, первоначально запасённой в рассматриваемом контуре.

Мало того, по Максвеллу, для распространения этих волновых процессов совершенно не требовалась среда, **они могли путешествовать в пустоте.**

Сейчас можно только представить, как эта идея подействовала на учёный мир, полагавший, кстати, не без оснований, что распространения волны обязательно должно быть связано с теми или иными деформациями среды. В этом плане уравнения Максвелла были просто опасны для всего, что было написано по электродинамике до того, так как они не оставляли камня на камне в электродинамических замках, построенных многими поколениями талантливых учёных.

Но очевидно именно в этом и состоит суть прогресса, когда на смену, казалось бы, безупречным причёсанным временем теориям, приходят, кажущиеся по началу несуразными, новые воззрения и напористо занимают своё место под Солнцем. Так случилось и с системой уравнений Максвелла.

Максвелл, по остроумному выражению Роберта Милликена: «...Облек плебейски обнажённые представления Фарадея в аристократические одежды математики».

Умер Максвелл от рака, не дожив до пятидесятилетия двух лет. Век гениев короток, так уж распорядится судьба. Он не дожид до триумфального шествия своей теории по лабораториям, конструкторским бюро, цехам производств и страницам университетских и школьных учебников.

Два человека, следуя идеям и принципам Максвелла, после его смерти пытались разработать такую же всеобъемлющую теорию гравитационного поля. Этими людьми были Хевисайд (1850 – 1920 гг.) и Эйнштейн (1879 – 1955 гг.), они пытались объединить электромагнетизм и гравитацию в виде единой теории поля.

Как известно, Эйнштейну это не удалось. По отношению к загадочному и малоизвестному широким массам Хевисайду такого, с полной уверенностью, сказать нельзя.

После его смерти в 1925 г. рукописи, посвящённые этой задаче, были таинственным образом похищены и не обнаружены до настоящего времени.

Но, в оставшихся неопубликованных рукописях, была найдена знаменитая формула $E = mc^2$, которая была записана за 15 лет до Эйнштейна!?

Значит, размышлял-таки Хевисайд о возможности непосредственного преобразования массы в энергию, о взаимосвязи инертных и электромагнитных свойств Мира в материальном и полевом состоянии. Очень странная история.....

О Хевисайде теперь пишут незаслуженно мало, хотя именно ему принадлежит приоритет в следующих научных открытиях:

- Создание векторного анализа;
- Создание операционного исчисления (теория преобразований Лапласа);
- Упрощение 20 уравнений Максвелла с 20 переменными и сведение их к четырём уравнениям с двумя переменными – векторами электрического и магнитного поля.

- В 1890 году, за пятнадцать лет до Эйнштейна, Хевисайд получил знаменитую формулу $E = mc^2$;
- Предсказал наличие особого слоя озона у атмосферы (ионосферы), благодаря этому возможна сверхдальняя радиосвязь;
- Предсказал в 1895 году излучение, открытое позже Вавиловым и Черенковым;
- Ввел в физику дельта-функцию (Дирака);
- На тридцать лет раньше Дирака обосновал магнитный монополю, споры о котором не утихают и теперь ввиду отсутствия экспериментальных подтверждений его существования в природе как такового.

Методы работы Хевисайда были не типичными для академической среды того времени. Будучи неплохим во всех отношениях математиком, он считал, что математика является служанкой науки и техники.

У Хевисайда вошло в обычное дело обнаруживать готовые формулы, не вдаваясь в подробности их вывода и обоснования. Он пробовал писать в научные журналы, но там его статьи попросту не понимали, настолько были подходы нетрадиционны, а выводы часто шли в разрез с общепринятыми теориями.

Когда Хевисайду предложили проверить математические выкладки Максвелла, то он счёл это бессмысленным, потому что конечная запись уравнений не могла, по его мнению, быть иной.

Когда Генрих Герц прислал Хевисайду знаменитые 20 уравнений максвелловской электродинамики, с просьбой попытаться их упростить. Хевисайд незамедлительно отреагировал, применив разработанный им метод векторного анализа, после чего у Герца всё получилось и он в своей работе об открытии электромагнитных волн выразил Хевисайду благодарность.

Прочитав об открытии Герцем электромагнитных волн, Хевисайд высказал предположение о наличии в верхних слоях атмосферы особого слоя (впоследствии назван слоем Хевисайда), который по своим электрическим свойствам должен работать для волн этого класса как зеркало для света.

Он предрёк возможность осуществления сверхдальней радиосвязи. Естественно, что этого откровения великого учёного никто не заметил. Вспомнили только тогда, когда искусственно полученные электромагнитные волны начали использоваться для передачи информации без проводов.



Рис. 2.20. Радиоволны в ионосфере

2.4. Электромагнитные волны

Из приведенных выше сведений следует, что Максвелл проанализировал все известные к тому времени законы электродинамики и сделал попытку применить их к изменяющемуся во времени электрическому и магнитному полю. Он обратил внимание на асимметрию взаимосвязи между электрическими и магнитными явлениями. Максвелл ввел в физику понятие вихревого электрического поля и предложил новую трактовку закона электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1831 г. Уравнения Максвелла – Герца – Хевисайда утверждают, что:

- всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты;
- изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.

Если возбудить посредством периодически колеблющихся зарядов **переменное электромагнитное поле**, то в окружающем пространстве **возникнет последовательное взаимное превращение электрических и магнитных полей**, распространяющееся от точки к точке.

Естественно, что процесс будет периодическим во времени и в пространстве, т.е. он будет представлять собой волну. Существование электромагнитных волн, как отмечено выше, вытекает непосредственно из уравнений Максвелла – Герца – Хевисайда.

Распространение электромагнитной волны в пространстве описывается волновыми уравнениями, связывающими изменение векторов напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в пространстве и времени

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \end{aligned} \right\}$$

Всякая зависимость, удовлетворяющая этим уравнениям должна описывать волновой процесс. Напряженности магнитного и электрического полей являются функциями времени и координат. Наличие в уравнениях скорости света, которая в данном случае должна рассматриваться как фазовая скорость электромагнитных волн.

Решениями уравнений в случае плоской волны будут являться функции

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= E_m \sin(\omega t - kx); \\ \vec{H} &= H_m \sin(\omega t - kx). \end{aligned} \right\}$$

На рис. 2.21 приведено, «остановленное» во времени распределение напряженностей Электрического и магнитного поля для плоской волны. Направление волны и векторы напряженностей образуют правовинтовую систему.

Колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне протекают с одинаковой фазой, т.е. максимумы вектора напряженности электрического поля и магнитного поля наблюдаются в одни и те же моменты времени, т.е.

$$E_m \sqrt{\epsilon \epsilon_0} = H_m \sqrt{\mu \mu_0}.$$

Скорость электромагнитных волн в среде будет в соответствии с уравнением определяться как

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}}.$$

Для вакуума и воздуха
 $c \cong 3 \cdot 10^8$ м/с.

Электромагнитные волны способны распространять в пространстве энергию, свидетельством тому, в частности, является факт существования всего живого на нашей планете исключительно за счёт энергии, излучаемой Солнцем в виде света и тепла.

Кто в детстве не развлекался в солнечный день увеличительным стеклом (линзой), поднимая локально температуру подвернувшихся под руку предметов? Ведро холодной воды, выставленное на солнце, со временем увеличивает свою температуру. Эти факты свидетельствуют о том, что **солнечное электромагнитное излучение обладает энергией**, способной, в частности, перейти в тепло.

Получим энергетические соотношения, характеризующие электромагнитное поле. Для электрической составляющей поля можно использовать энергетические соотношения конденсатора

$$W_E = \frac{CU^2}{2}; \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}; \quad E = \frac{U}{d}.$$

Заменяя в уравнении для W_E C и U , получим

$$W_E = \frac{\epsilon \epsilon_0 S E^2 d^2}{2d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} S d = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} V.$$

Плотность энергии электрического поля, при этом, определится как

$$\varpi_E = \frac{W_E}{V} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right];$$

Магнитное поле рассмотрим на примере соленоида, длиной ℓ , площадью поперечного сечения s , содержащего N витков. Такой соленоид обладает индуктивностью

$$L = \frac{\mu \mu_0 N^2 s}{\ell};$$

Величина магнитной индукции внутри соленоида зависит от силы тока, текущего по обмотке и магнитной проницаемости сердечника, если таковой имеется

$$B = \frac{\mu \mu_0 N I}{\ell} \Rightarrow I^2 = \frac{B^2 \ell^2}{(\mu \mu_0)^2 N^2};$$

Энергия поля, заключенного внутри соленоида, равна

$$W_B = \frac{L I^2}{2}.$$

Подставим в уравнение для W_B значения L и I^2

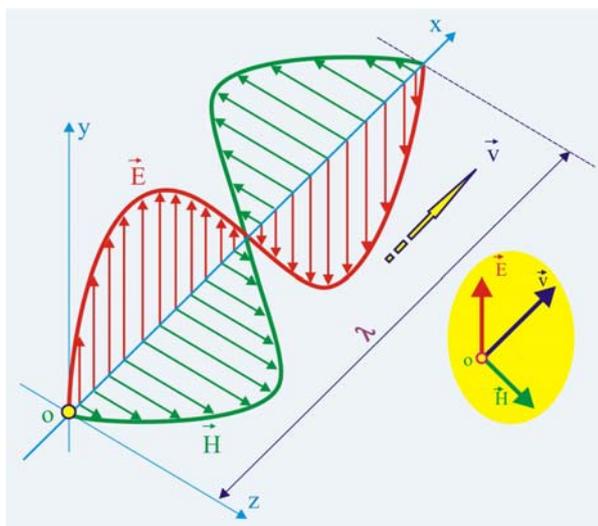


Рис. 2.21. Изменение векторов \vec{E} и \vec{H} во времени и пространстве

$$W_B = \frac{1}{2} \frac{\mu\mu_0 N^2 s}{\ell} \frac{B^2 \ell^2}{(\mu\mu_0)^2 N^2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \ell s = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} V;$$

Объёмная плотность энергии магнитного поля запишется так:

$$\varpi_B = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0}.$$

Объёмная плотность электромагнитного поля в вакууме определится в виде суммы уравнений

$$\varpi = \varpi_E + \varpi_B = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0};$$

$$\varpi = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 B^2;$$

Для вакуума или воздуха имеют место соотношения:

$$\frac{B}{E} = c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \Rightarrow B = \frac{E}{c} = E \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0};$$

получим

$$\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2.$$

С учётом последних преобразований уравнение плотности энергии возможно записать в окончательном виде

$$\varpi = 2\varpi_E = 2\varpi_B = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} EB.$$

Для электромагнитного поля в среде, обладающей диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью μ определится как

$$\varpi = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} EB = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} EH.$$



Рис. 2.22. Н.А. Умов

Таким образом, полная плотность энергии электромагнитного поля складывается из двух равных по величине вкладов, соответствующих плотностям электрического и магнитного полей.

Определим далее энергию, переносимую электромагнитной волной в единицу времени через единичную площадь. Эту векторную величину называют обычно **вектором Умова - Пойтинга**.

Умов Николай Алексеевич (1846 – 1915 гг.), выпускник московского университета. После получения магистерского и доцентского званий преподавал в Новороссийском университете. После смерти Столетова был приглашён заведовать кафедрой физики московского университета. В 1911 г. в знак протеста против политики правительства в области образования, ушёл из университета, занялся научной деятельностью. В 1874 г. Умовым была защищена докторская диссертация на тему «Уравнения движения энергии», где и была предложена новая векторная величина, так называемый – **вектор Умова**.

Пойтинг Джон Генри (1852 - 1914), выпускник Кембриджа, профессор Мезон – колледжа (г. Бирмингем), приятель знаменитого Дж. Дж. Томсона. В 1884 году (десятилетие спустя поле Умова) опубликовал работу «О переносе энергии в электромагнитном поле», где без всяких, подобающих такому случаю ссылок, ввёл вектор Умова, который в западных изданиях именуется как вектор Пойтинга.

Определим энергию электромагнитной волны из уравнения (2.183)

$$\varpi = \varepsilon\varepsilon_0 E^2; \quad \Rightarrow \quad W = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \cdot V.$$

Запишем выражение для плотности потока энергии через единичную площадку s за время dt

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{s} \frac{dW}{dt} = \frac{1}{s} \frac{d}{dt} (\varepsilon\varepsilon_0 E^2 s dx) = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \frac{dx}{dt} = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 c.$$

Поскольку

$$E = cB; \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}},$$

то для вакуума

$$\vec{\mathfrak{R}} = \varepsilon_0 c \vec{E}^2 = \frac{c \vec{B}^2}{\mu_0} = \frac{\vec{E} \vec{B}}{\mu_0}.$$

Вектор $\vec{\mathfrak{R}}$ по направлению совпадает с направлением переноса энергии, т.е. с вектором \vec{v} , $\vec{\mathfrak{R}}$ перпендикулярен \vec{E} и \vec{H} . Такое взаимное расположение векторов описывается, как известно, векторным произведением

$$\vec{\mathfrak{R}} = \frac{1}{\mu_0} [\vec{E} \times \vec{B}] = [\vec{E} \times \vec{H}]$$

За один период колебаний величина $|\vec{\mathfrak{R}}|$ дважды достигает своего максимального значения и дважды обращается в ноль, среднее же значение модуля вектора Умова – Пойтинга равно

$$|\vec{\mathfrak{R}}| = \frac{EH}{2}.$$

Ещё одной важной характеристикой электромагнитных волн является **интенсивность** J – величина, численно равная энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны

$$J = \langle \vec{\mathfrak{R}} \rangle.$$

Процесс поглощения электромагнитной волны веществом сопровождается сообщением структурным элементам среды импульса, т.е. электромагнитная волна оказывает на поглощающее тело давление.

Давление возникает вследствие направленного движения заряженных частиц вещества и их взаимодействия с магнитным полем. Давление электромагнитных волн имеет весьма малое значение.

Солнечное излучение на абсолютно поглощающей поверхности создаёт давление порядка 5 мкПа. Экспериментально давление света обнаружено Петром Николаевичем Лебедевым (1866 – 1912), который ассистировал А.Г. Столетову в Московском университете. Импульс ЭМ - волны можно записать так

$$p = \frac{1}{c} W.$$

Полагая импульс равным $p = mc$, получим, что $W = mc^2$.

Электромагнитные волны могут возбуждаться только ускоренно движущимися зарядами. Цепи постоянного тока, в которых носители заряда движутся с неизменной скоростью, не являются источником электромагнитных волн.

В современной электронике излучение электромагнитных волн производится с помощью антенн различных конструкций, в которых возбуждаются, изменяющиеся по определённым законам электрические токи. Простейшим излучателем электромагнитных волн, является электрический диполь с изменяющимся во времени дипольным моментом. Такой элементарный диполь называется диполем Генриха Герца.

Прежде чем приступить к обсуждению особенностей излучения электромагнитных волн, следует сказать несколько слов о проблеме передачи взаимодействий в природе и теории мирового эфира.

Проблема пустоты с давних времён занимала умы учёных, вызывая постоянно оживлённые дискуссии. Повседневный опыт на уровне наших ощущений говорит о том, что взаимодействия происходят при непосредственном контакте взаимодействующих объектов. Обобщил житейские наблюдения Аристотель, введя понятия силы тяги, силы давления и силы удара.

Аристотель полагал, что брошенное тело «ведёт» среда. В пустоте взаимодействие а, следовательно, и движение не возможно, значит – пустота, тоже невозможна. Довольно логично.

Идея Аристотеля о невозможности пустоты была поставлена под сомнение только в XVII веке после изобретения ртутного барометра учеником великого Галилея, Эванжелистой Торричелли (1608 – 1647 гг.). Торричелли, по сути, открыл вакуум, свойства которого потом исследовали французский математик, физик, философ и писатель Блез Паскаль (1623 – 1662 гг.) и бургомистр Магденбурга Отто фон Герике. Эксперименты показали, помимо прочего, что вакуум не проводит звук, но проводит свет.

Следующим, кто всерьёз занялся свойствами пустоты, был неутомимый Рене Декарт. Принципиально отвергая существование пустоты, он ввёл понятие эфира. Мир, по Декарту, заполнен эфиром – тонкой материей, в которой возникают вихри, способные обеспечивать взаимодействие, опять же исключительно механическим путём.

В следующем, XVIII веке тория великого Ньютона своим блеском и величием затмила все прочие теории, показав несостоятельность по многим позициям учения Аристотеля. Всё что происходило в науке, оценивалось с позиций теории механического движения Ньютона. Но механика Ньютона была не всесильна.

Трудности возникли при объяснении взаимодействия на расстоянии, например гравитационного. И со светом, тоже было не совсем всё понятно. Ньютоновские корпускулы стали на долгие времена причиной переноса различных действий на расстояние.

Каждое конкретное действие требовало своих корпускул. В науку пришло туманное, но романтическое понятие эфира. Так появился флогистон – некое невесомое, летучее, невидимое вещество, определяющее тепловое состояние тел. А потом стали в моде разного рода флюиды в виде теплорода, электрических флюидов Кулона и т.д. Одним словом, появление нового явления, где взаимодействие происходило без непосредственного контакта, сопровождалось введением нового сорта флюида, который помещался между взаимодействующими объектами.

Постепенно, по мере установления аналогий между явлениями, количество флюидов уменьшилось, и все их заменили одним, ещё более туманным все проникающим универсальным эфиром. Но все попытки обращения к эфиру для трактов-

ки передачи действия на расстоянии оказались бесплодными, потому что автоматически на него переносились свойства обычной материи.

К окончанию XIX века уже было установлена непрерывность пространства, было ясно, что в каждой точке любая физическая величина имеет вполне определённое значение, причём переход от точки к точке носит непрерывный и плавный характер. Эфир постепенно вытеснялся более прагматичным понятием поля. Образом поля в различных отделах физики, в принципе, начали пользоваться со второй половины XIX века. Например, при объяснении явлений электрического и магнитного свойства.

Генрих Рудольф Герц является настолько неординарной личностью в современной и классической физике, что о нём следует сказать особо и более подробно. Родился Герц в г. Гамбурге в семье адвоката. Образование Герц получил совершенно стандартное для того времени: реальное училище, городская гимназия, высшее Дрезденское техническое училище, мюнхенский университет, берлинский университет.

На всех этапах учёбы Генрих блистал и был замечен одним из самых знаменитых немецких физиков Германом Гельмгольцем (1821 – 1894 гг.), это решило дальнейшую научную судьбу способного молодого человека. Этот волевой и целенаправленный учёный с широчайшими научными интересами, что вполне типично для того времени, имел на Герца огромное влияние.

Гельмгольц, не подозревая о работах Ломоносова и Майера – Джоуля, в довольно юном возрасте обосновал закон сохранения и превращения энергии, затем он не без успехов занимался физиологией (одно из образований было медицинским), но научная зрелость была посвящена теории электричества, последняя, так сказать, любовь.

Гельмгольц, пожалуй, первый обратил достойное внимание на работы Максвелла. Они производили на него неоднозначное впечатление. С одной стороны он понимал роль промежуточной среды в теории электромагнитных волн, с другой стороны, смириться с тем, что этой средой может быть «ничто» он не мог.

Будучи приверженцем идей Канта, о невозможности познания мира, он исповедовал в электричестве учение о дальнодействии, несмотря на его очевидные несоответствия с реалиями. Генрих Герц всю свою короткую, но яркую жизнь старался подтвердить научные взгляды своего учителя, но никогда не прогибался и всегда был предельно честен.

День 14 ноября 1886 г. можно считать днём открытия (вопреки себе и учителю) электромагнитных волн. Именно в этот день, по-немецки пунктуальный, Герц записал в своём дневнике: **«Посчастливилось установить индукционное действие друг на друга двух незамкнутых цепей с током. Длина цепей 3м, расстояние между ними 1,5м.»**

Экспериментальная установка герца была до удивления проста и не содержала ни одного нового элемента. Всё что использовал юный гений, можно было отыскать в любой даже самой захудалой физической лаборатории школьного уровня того времени (рис. 2.23).

Установка состояла из индуктора Румкорфа 1, представляющего собой в современном понимании, повышающий трансформатор, у которого обе обмотки распо-

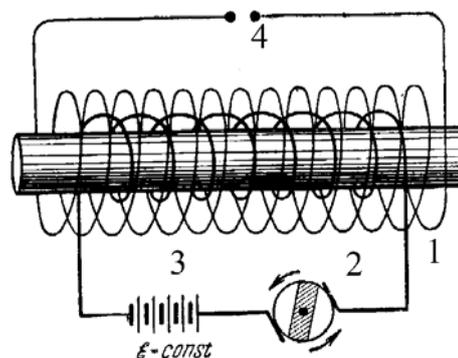


Рис.2.23. Установка Герца

жены на одном незамкнутом цилиндрическом сердечнике. В цепи первичной обмотки включался источник ЭДС 3 и механический прерыватель 2, в виде диэлектрического вращающегося диска с проводящей вставкой и двумя радиальными контактами.

Вторичная обмотка соединялась с разрядниками 4, между которыми проскакивала искра во время размыкания контактов в цепи первичной обмотки. Идея использования механического прерывателя для получения импульсов напряжения довольно значительной величины (несколько киловольт) используется в некоторых недавних карбюраторных двигателях внутреннего сгорания.

Недалеко от разрядников 4 Герц разместил ещё пару разрядников, соединённых с проволочным контуром. Проводя эксперимент в тёмной комнате, Герц обнаружил искрение между разрядниками. Это означало, что электрический импульс был передан на расстояние около полутора метров совершенно без проводов. Вопреки первоначальным установкам Гельмгольца, всё шло к тому, что англичанин прав – волны существуют.

В ходе дальнейших захватывающих экспериментов Герцу удалось установить, что предсказанные Максвеллом волны экранируются стальным листом, а фанерные и деревянные препятствия для них не являются преградой.

Обнаруженные Герцем искровые волны в явном виде демонстрировали свойства аналогичные свету. Посчитав приближённо скорость распространения исследуемых волн, Герц убедился, что и тут Максвелл прав – волны распространялись со скоростью очень близкой к скорости света.

Чтобы окончательно убедить себя, а особенно, своего учителя, в том что он имеет дело именно с волнами, Герц ставит эксперимент с преломлением на асфальтовой призме весом около двух тонн. Поместив призму между излучателем и приёмником, он обнаруживает отклонение от прямолинейного распространения.

Как пишет по этому поводу В. Карцев: «Трудно сейчас представить себе бурю, вызванную открытиями Герца. Для физиков, они, прежде всего, означали полный

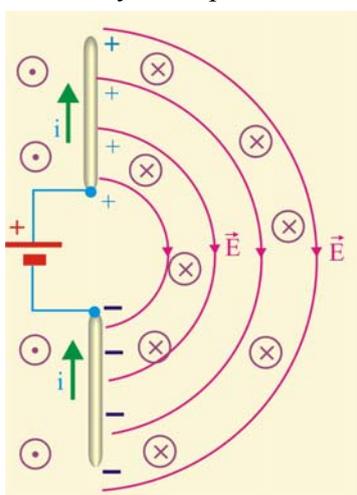


Рис.2.24. Образование электромагнитных волн

триумф уравнений Максвелла и забвение всех других электродинамических теорий. Все неисчислимое бумажное многообразие курсов электродинамики Неймана, Вебера, Гельмгольца и множества других авторов нашло свою гавань в пыльных архивах науки, уступив место нескольким строкам максвелловских уравнений». Следует, однако, отметить, что появление теории стало возможным благодаря предшественникам, заложившим основы знаний об электромагнетизме.

Рассмотрим физические особенности процесса генерирования электромагнитных волн на примере двух проводящих стержней, подключенных к источнику постоянного тока (рис.2.24), которые получили название – вибратор Герца.

Проводящие стержни соединены с источником постоянного тока. При замыкании ключа верхний стержень приобретает быстро положительный заряд, а нижний – отрицательный. Структура электрического поля показана в виде концентрических окружностей. Во время перемещения зарядов по стержням текут токи, стрелками показано направление движения положительных зарядов. Электрический ток создаёт магнитное поле

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r};$$

Линии магнитной индукции этого поля представляют собой концентрические окружности, охватывающие стержни. Представим далее более сложную ситуацию, когда вместо источника постоянного тока в цепи стержней включен генератор переменного тока

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t).$$

Такая конструкция называется электрическим дипольным вибратором. В любой момент времени существует разделение зарядов, что обеспечивает наличие дипольного момента. Так как знак заряда на стержнях будет периодически меняться, то дипольный момент антенны осциллирует.

В этом случае ток в стержнях будет менять своё направление, следовательно, будет меняться и направления полей, причём ввиду невозможности исчезать мгновенно, линии замыкаются. При замыкании силовых линий образуются контуры, которые продолжают распространяться в окружающем пространстве.

В любой точке пространства, таким образом, векторы \vec{B} и \vec{E} перпендикулярны друг другу и вектору скорости распространения волны. Модули напряжённости и индукции будут меняться по синусоидальному закону, в соответствии с изменением ЭДС.

$$E = E_y = E_0 \sin \omega t;$$

$$B = B_z = B_0 \sin \omega t;$$

Электромагнитные волны являются поперечными, потому что векторы \vec{E} и \vec{B} лежат в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения.

Интересным является и тот факт, что электромагнитные волны образуются колеблющимися зарядами, т.е. зарядами, движущимися с ускорением. В этой связи естественно предположить, что всякий движущийся с ускорением заряд излучает электромагнитные волны.

Таким образом, по Максвеллу, электрические и магнитные поля не могут существовать обособленно. **Невозможно создать переменное магнитное поле в пространстве, чтобы не возникло при этом электрическое поле и наоборот.**

Рассмотрим подробнее «антенну», схема которой приведена на рисунке 2.37, но источник постоянного тока заменим генератором, обеспечивающим изменение тока по синусоидальному закону. До настоящего времени законченной теории ближнего поля излучателей не существует. Поле существенно упрощается на расстояниях $r \gg \lambda$.

Если генерирование электромагнитных волн происходит в однородной изотропной среде, то волновой фронт будет сферическим. Векторы \vec{E} и \vec{B} в каждой точке волнового фронта будут взаимно перпендикулярны и перпендикулярны радиус-вектору, проведенному из центра диполя. Диполь (рис.2.25) обладает направленными свойствами.

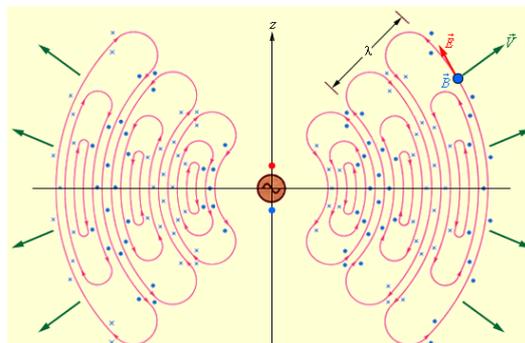


Рис. 2.25. Излучение диполя (вибратора Герца)

Диаграмма направленности диполя имеет вид восьмёрки. Диаграмма направленности характеризует свойство антенны концентрировать электромагнитную энергию в определенном направлении.

Чем уже диаграмма направленности, тем больше дальность действия излучате-

ля. Ширина диаграммы направленности определяется конструктивными параметрами и частотой.

Когда обнаружилось, что электромагнитные волны могут распространяться в пустоте, являясь одновременно и переносчиком световой энергии, то стало предельно очевидным, каким образом Солнце снабжает энергией нашу планету.

Солнечный свет представляет собой, по сути сложный набор электромагнитных волн инфракрасного, оптического и ультрафиолетового диапазона.

В зависимости от величины длины волны излучение имеет разнообразные энергетические проявления. В таб. 2.1 приведены, обнаруженные к настоящему времени электромагнитные волны.

Таблица 2.1

Длина	Наименование	Частота
100 км и более	Низкочастотные электрические колебания	0 – 3 кГц
100 км – 1 мм	Радиоволны:	3 кГц – 3 ТГц
100 – 10 км	мираметровые (очень низкие частоты)	3 – 30 кГц
10 – 1 км	километровые (низкие частоты)	30 – 300 кГц
1 км – 100 м	гектометровые (средние частоты)	300 кГц – 3 МГц
100 – 10 м	декаметровые (высокие частоты)	3 – 30 МГц
10 – 1 м	метровые (очень высокие частоты)	30 – 300 МГц
1 м – 10 см	дециметровые (ультравысокие частоты)	300 – 3 ГГц
10 – 1 см	сантиметровые (сверхвысокие частоты)	3 – 30 ГГц
1 – 1 мм	миллиметровые	30 – 300 ГГц
1 – 0,1 мм	децимиллиметровые (гипервысокие частоты)	300 – 3 ТГц
2 мм – 760 нм	Инфракрасное излучение	150 ГГц – 400 ТГц
760 – 380 нм	Видимое излучение	400 ТГц – 800 ТГц
380 – 3 нм	Ультрафиолетовое излучение	800 ТГц – 100 ПГц
10 нм – 1 пм	Рентгеновское излучение	300 ПГц – 300 ЭГц
до 10 пм	Гамма-излучение	до 30 ЭГц

2.5. Излучение и приём электромагнитной энергии

Данные табл. 2.1 при внимательном рассмотрении дают основания утверждать, что электромагнитные волны, как переносчики энергии различного достоинства, во всём их многообразии являются самыми распространёнными в окружающем нас Мире.

Действительно, даже возникновение и развитие жизни на нашей планете стало возможным благодаря электромагнитной энергии, посылаемой в окружающее пространство Солнцем.

Первобытный человек, согревающийся у костра, не подозревая, что получает тепловую энергию, в частности, посредством электромагнитных волн инфракрасного и оптического диапазона, стал доминировать именно благодаря умению пользоваться этой энергией.

Человек, как и многие другие живые организмы, располагает двумя информационными каналами, акустическим и оптическим.

Оптический канал. Наше зрение, основано на приёме и обработке электромагнитных волн с длинами $\lambda = 380 - 760$ нм (рис. 2.26). В сравнении со всей шкалой электромагнитных волн, выделенный природой человеку диапазон, конечно весьма узок, многие животные, например змеи, видят и в инфракрасном диапазоне, а волны оптического диапазона воспринимают гораздо хуже человека. Таким образом, в подавляющем большинстве, живые организмы воспринимают этот мир благодаря природному дару «видеть» и обрабатывать электромагнитные волны.

Оптическое устройство глаза достаточно хорошо изучено, чего нельзя сказать о процессах формирования зрительных образов. Впрочем, и с другим каналом информации, акустическим, такая же картина.

Всё что касается акустики и механики слуха достаточно полно изучено, а вот с акустическими образами, мягко говоря, не совсем всё ясно. Почему «если железом по стеклу», то это плохо, звук морского прибоя – это хорошо? Процессы, протекающие в мозгу при обработке акустических и электромагнитных волн, изучены только на качественном уровне. Теорий, строго говоря, много, но все они носят частный характер.

Электромагнитные волны с длинами от $\lambda = 100$ км и до $\lambda = 0,1$ мм нашими органами чувств осознанно не воспринимаются, хотя влияние на организм человека и животных оказывают. Реагируют же негативно люди на электромагнитные вспышки на Солнце, да и не только люди. Кстати, влияние электромагнитного излучения нашего светила на земную жизнь впервые было обнаружено по циклично-



Рис. 2.26. Приёмник электромагнитной энергии в оптическом диапазоне длин волн

сти урожайности пшеницы и по годовым кольцам деревьев. Именно анализ этой информации позволил установить двенадцатилетний цикл активности нашей «домашней» звезды.

Особое место в жизни и развитии современной цивилизации занимают электромагнитные волны, так называемого, радиодиапазона. Освоение этой электромагнитной энергетической ниши началось в 1845 г. стараниями Майкла Фарадея, который впервые ввёл понятие электромагнитного поля.

Это было одним из самых значимых научных открытий со времён Ньютона, как с теоретических позиций, так и в практическом плане. Фарадей впервые из всех осознал, что электромагнитное поле может существовать в пустоте, обладая при этом вполне определённой энергией, как и всякая волна в среде.

Далее на научном горизонте вошла звезда сразу трёх гениев, Максвелла, Герца и Хевисайда. В 1865 г. Максвелл предложил свою электродинамику, предсказавшую наличие электромагнитных волн. Главный вывод следовавший из уравнений Максвелла заключался в возможности распространения электромагнитной энергии в пространстве со скоростью света.

В 1887 – 1888 гг. Генрих Герц, ведомый опытным и маститым Гельмгольцем, пытаясь опровергнуть Максвелла, экспериментально подтвердил существование электромагнитных волн. Вскоре после экспериментов, доказавших, что излучение диполя является волной нового типа, Герц совместно с Хевисайдом двадцать уравнений Максвелла свели всего к четырём уравнениям, которые, в принципе описали многие физические, давно не дававшие покоя учёным явления, включая излучение Солнца и других космических объектов.

Дальше общественное мнение о приоритетах в развитии излучения и приёма электромагнитной энергии радиодиапазона резко поделилось.

Оспаривают лидерство наш соотечественник Александр Степанович Попов и итальянский инженер Гульельмо Маркони.

Попов 25 апреля (7 мая – по новому стилю) 1895 г., будучи преподавателем военно-морского высшего учебного заведения в Кронштадте на собрании научного общества впервые в мире сообщил об изобретении им метода и прибора для использования электромагнитных волн при беспроводной передаче информации.

Менее чем через год Попов продемонстрировал устройство, посредством которого он без проводов передал радиограмму, состоящую всего из двух слов: «Генрих Герц».

Подробное описание аппаратуры Попова было сделано в ряде журналов Русского физико-химического общества в феврале, ноябре 1895 г., там же автором был изложен принцип модуляции высокочастотных колебаний низкочастотными колебаниями звукового диапазона.

После пробной радиопередачи А.С. Попов интенсивно исследовал методы увеличения дальности передачи информации в виде электромаг-



Рис. 2.27. А.С. Попов и Г. Маркони

нитных волн. По решению командования Балтийского флота были изготовлены несколько комплектов аппаратуры, которую смонтировали на кораблях.

Для расширения внедрения конструкторская документация была передана иностранным изготовителям в Германии и Франции. Несколько образцов аппаратов Попова было выпущено в Англии военным ведомством.

Публикации Попова привлекли внимание известного физика Аугусто Риги из Болонского университета, который познакомил с научной новинкой молодого, но очень предприимчивого инженера Гульельмо Маркони. Повторив опыты Попова Маркони 2 марта 1897 г., узнав, что Попов заявку на изобретение не подавал, тут же в Англии оформил патент и 2 марта 1897 г. его получил за №12039.

Из текста патента следовало, что Маркони в своём патенте применил приёмник энергии электромагнитных волн А.С. Попова, добавив в схему отдельное питание от химического источника тока звонка.

Даже в таком варианте Маркони по времени отстал от Попова, практически, на 2 года. Далее Маркони создаёт фирму «Marconi Telegraph Company» и начинает снабжать аппаратами весь английский флот.

Повторилась история испанского компаса. Испания родина компаса и всё тут. Китайцы и Викинги выходные. А Маркони для всей Европы изобретатель радио, Попов вроде и ни при делах. Очевидно в таком положении дел больше политики, чем здравого научно-технического смысла.

Основным элементом в первом приёмнике А.С. Попова являлся когерер Лоджа (рис. 2.28). Когерер представлял собой активный элемент, изменяющий своё сопротивление при внешних воздействиях. Таким воздействием была энергия электромагнитной волны.

Когерер (рис. 2.29) представлял собой стеклянную трубку, заполненную железными опилками. В обычном состоянии трубка с опилками обладала вследствие плохого электрического контакта между отдельными частичками проводника большим омическим сопротивлением, порядка одного мегома.

При прохождении электромагнитной волны между частичками проводника проскакивают электрические разряды (искорки) и частички слипаются, уменьшая в 100 – 200 раз сопротивление когерера за счёт точечного разрушения окисных плёнок на поверхности металлических опилок.

Для приведения устройства в исходное состояние его необходимо встряхивать, чтобы разрушить установившиеся под действием энергии электромагнитной волны контакты.

Таким образом когерер, подобно современному электронному устройству триггеру Шмидта имеет два устойчивых состояния, причём в состояние малого сопротивления от переводится внешним электромагнитным воздействием, а в состояние высокого омического сопротивления – внешним механическим воздействием. По сути, когерер является своеобразным ключом с «защёлкой», фиксирующим прохождение электромагнитного импульса.

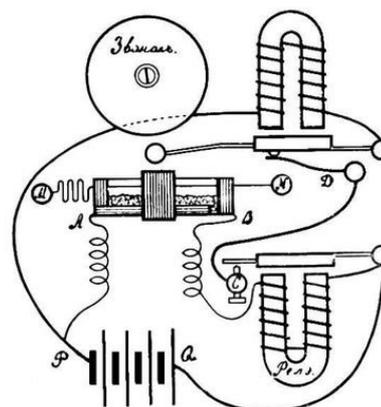


Рис. 2.28. Схема приёмника Попова



Рис. 2.29. Когерер Лоджа

Когерер был изобретён Эдвардом Бранли в 1890 г. В 1894 г. устройство было усовершенствовано Оливером Лоджем, который для встряхивания когерера приспособил ударник с часовым механизмом, через заданные промежутки времени ударник сотрясал трубку с опилками, приводя её в состояние большого сопротивления.

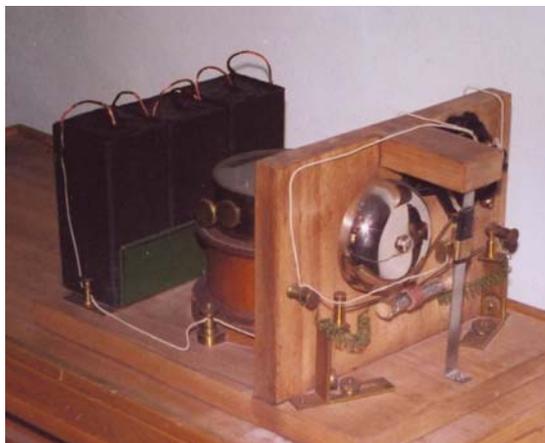


Рис. 2.30. Приёмник (грозоотметчик) Попова (музейный экспонат)

Александр Степанович Попов использовал когерер Лоджа в своём первом приёмнике, который регистрировал электромагнитное излучение, сопровождающее грозные разряды, т.е. им был построен первый в мире грозоотметчик.

На рис. 2.30 показан образец грозоотметчика А.С. Попова. Первые эксперименты Попов провёл в начале 1895 г., расположив рядом с приёмником вибратор Герца. Во время этих экспериментов впервые в мировой практике была использована антенна в виде длинного провода, подключаемого

к одному из контактов когерера, второй контакт заземлялся.

Эти нововведения позволили фиксировать искровые разряды, генерируемые вибратором Герца на расстоянии 60 м. Во время экспериментов Попов заметил, что время от времени приёмник регистрировал не волны, излучаемые вибратором, а какое-то постороннее более мощное излучение. Наблюдения показали, что приёмник реагирует на грозные разряды.

Обнаружив такое свойство своего прибора Попов изготовил новый образец приёмника, снабдив его самописцем с бумажной лентой, размещённой на барабане (рис. 2.31).

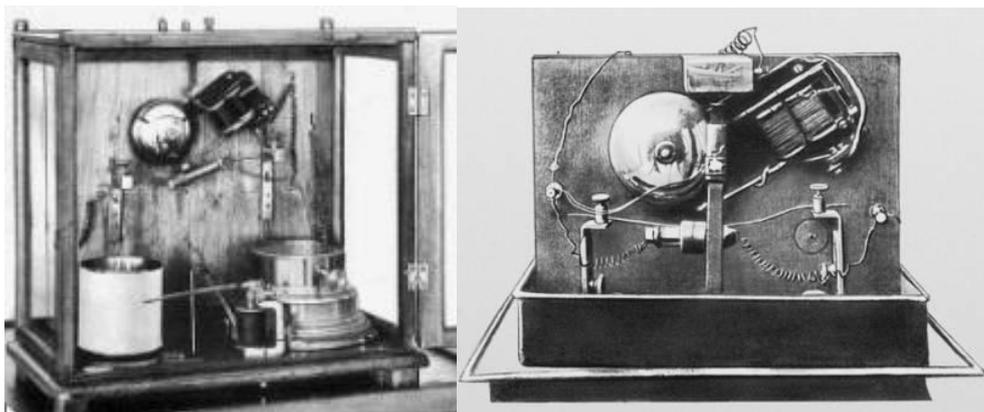


Рис. 2.31. Грозоотметчик и радиотелеграф А.С. Попова

Грозоотметчик Попова был установлен в лаборатории лесного института и мог фиксировать приближение грозы за 30 км

Но главной целью Александра Степановича было получение аппарата для телеграфной связи без проводов. В марте 1896 г. Попов продемонстрировал первую в мире передачу осмысленной информации из одного здания в другое, находящееся на расстоянии 250 м. В химическом корпусе Петербургского университета был расположен передатчик, а в физической лаборатории – приёмник.

В лаборатории помимо высоких военно-морских чинов присутствовали ведущие учёные – электрики: О. Д. Хвольсон, И. И. Боргман, А. И. Садовский, В. К. Лебединский, М. А. Шателен, А. Л. Гершун, Г. А. Любославский, П. Н. Георгиевский, Н. А. Смирнов, В. В. Скобельцын, Н. А. Булгаков, Н. Г. Егоров и Ф. Ф. Петрушевский.

Текст телеграммы был известен только Попову, который перед демонстрацией дал возможность всем присутствующим ознакомиться с устройством приёмника и передатчика с собственными подробными комментариями в виде вступительного доклада. В физической лаборатории перед демонстрацией устройств Попова, совмещённых с аппаратом Морзе, стояла напряжённая тишина.

Практически все собравшиеся осознавали, что присутствуют при рождении чего-то из ряда вон выходящего, изобретения, которое может стать в истории всего человечества величайшим. Процесс приёма первой в мире радиограммы описал в своих воспоминаниях профессор Хвольсон О.Д.

Хвольсон писал: «Передача происходила таким образом, что буквы передавались по алфавиту Морзе и притом знаки были ясно слышны. У доски стоял председатель Физического общества проф. Ф. Ф. Петрушевский, имея в руках бумагу с ключом к алфавиту Морзе и кусок мела. После каждого передаваемого знака он смотрел в бумагу и затем записывал на доске соответствующую букву. Постепенно на доске получились слова Heinrich Hertz и притом латинскими буквами. Трудно описать восторг многочисленных присутствующих и овации А. С. Попову, когда эти два слова были написаны. Так начало свою жизнь одно из величайших изобретений человеческого гения. Великий изобретатель увековечил в первой радиограмме того, кто первым в мире наблюдал электромагнитные волны. А. С. Попов был первым человеком, заставившим эти волны служить человеку».

Будучи на службе в морском ведомстве Попов А.С. получил инструкции о не разглашении широко своего изобретения, поэтому запись в протоколах заседания научного общества звучала так:

«А.С. Попов продемонстрировал приборы для лекционных демонстраций опытов Генриха Герца. Описание их уже помещено в ЖРФХО, 1896 г., т. XXVIII, стр. 124».

Внедрение разработок Попова проходило не без трудностей. По стародавней отечественной практике чиновники морского ведомства были склонны более доверять иностранным фирмам, которые в основном удовлетворяли потребности флота в морских приборах, хотя офицерское собрание поддерживало предложения Попова.

Однако несмотря на финансовые ущемления Попов и его сторонники продолжали испытания и совершенствования аппаратов беспроводной связи. При испытаниях на кораблях Балтийского флота был обнаружен эффект временного замирания связи в моменты прохождения между приёмником и излучателем третьего судна, который был классифицирован Поповым, как влияние отражения передаваемого сигнала от проходящего корабля. Это был первый шаг к освоению **методов радиолокации**.

В 1897 г. средства связи были установлены на крейсере «Африка» и транспортном судне «Европа», где испытывались аппараты с телефонной трубкой вместо аппарата Морзе. Это позволило увеличить дальность уверенного приёма сообщений до 28 км. Попов получил привилегию на новый тип «...телефонного приемника депеш, посылаемых с помощью какого-либо источника электромагнитных волн по системе Морзе».

Патент на это открытие был зарегистрирован в Англии. По патентам приёмники Попова начала изготавливать французская фирма «Дюкрете» и Кронштадтская мастерская беспроводного телеграфа.

Беспроводный радиотелеграф А.С. Попова в первые в мировой практике был использован при морской спасательной операции. Броненосец «Генерал-адмирал Апраксин» во время сильного шторма выбросило на камни вблизи пустынного острова Гогланд. Судно получило множественные пробоины. Его спасение теоретически было возможным при наличии постоянной связи между кораблём и Петербургом.

Прокладка кабеля протяжённостью 40 км до ближайшего городка в Финляндии стоила более 20 000 руб. По тем временам это были очень большие деньги. Именно тогда, специально созданная комиссия министерства вспомнила, что есть некто А.С. Попов, который несколько лет подряд обращается с просьбами финансирования разработок беспроводного телеграфа. Другими словами, предчувствие беды колыхнуло спокойную чиновничью гладь.

Организовали специальную экспедицию по установке аппаратуры А.С. Попова на корабле. Аппараты обеспечили надёжную связь в течение всего зимнего периода, когда корабль стоял скованный льдами, но на нём под руководством специалистов – корабелов шли восстановительные работы.

Всего за время спасательной операции было отправлено 400 радиограмм. В один из дней с броненосца заметили льдину с 50 мечущимися по ней рыбаками. Координаты льдины по радиотелеграфу были переданы в Петербург, и льдину удалось перехватить ледоколу «Ермак».

После этих событий в апреле 1900 г. был издан указ: « О введении беспроводного телеграфа на боевых судах флота». В Кронштадте начало работу первое отечественное предприятие по производству радиостанций и подготовке специалистов из числа офицеров, но очень медленно.

Аппаратуры на все корабли не хватало и её стали закупать за рубежом, хотя изготовлена она была, в частности, и по патентам А.С. Попова. Это удручающее обстоятельство послужило одной из многочисленных причин поражения Российского флота в войне с Японией.

История великих отечественных изобретений повторяется с досадным постоянством. Вспомним по этому случаю Ивана Ивановича Ползунова, который на 8 лет раньше Уатта разработал проект огневой машины. И что? Кто порадовался и выхватил идею для внедрения и последующего обогащения? Никто. Так примерно произошло и с изобретениями Попова.

Оборотистый Маркони, начав заниматься радиосвязью, по началу всех уверял, что он только модернизирует установки русского изобретателя. Но скоро этот пустячок в творческой биографии был забыт и Маркони стал выступать как самостоятельный изобретатель. А уж когда он, честь ему и хвала за такую ухватистость, развернул массовое производство, то из сознания зарубежных заинтересованных людей, да и не только, фамилия А.С. Попова выветрилась окончательно.

По поводу современного состояния комплекса радиотехнических наук много говорить не имеет смысла. Всё с чем общается в трудовой и повседневной жизни человек в большей или меньшей степени, связано с изобретением А.С. Поповым принципа и устройств беспроводной радиосвязи. Трудно себе представить жизнь, хотя в принципе можно, без спутниковых систем связи, современного радио, телевидения, компьютерных технологий – всё огромное и стройное радиотехническое здание начиналось с первых краеугольных камней, которые заложил в фундамент А.С. Попов вместе с Фарадеем, Максвеллом, Герцем и Хевисайдом.

3. Атомное строение материи

3.1. Теоретические предпосылки

Предшествующее рассмотрение различных плодов естественнонаучного освоения Природы, которыми пользуется в настоящее время человечество, делало необходимым время от времени касаться структурного строения материи, особенно когда разговор шёл об энергии пара и электромагнитной энергии.

Интерес к устройству микромира, высказанный Демокритом возникал всякий раз, когда учёные пытались объяснить, откуда она берётся, эта самая энергия. Об атомистической теории Демокрита вспомнили, когда стали разбираться с теоретическими основаниями работы тепловых двигателей. Именно с XVIII в. исследования микромира стали проводиться на более или менее постоянной основе.

Использование атомной энергии, не осознанно, началось за долго до того, как о ней стали говорить учёные. Дело в том, что по современным представлениям, Солнце, обеспечившее возникновение и развитие жизни на Земле, представляет собой атомный источник энергии.

Термоядерные реакции, протекающие на нашей «домашней» звезде от начала возникновения планетной системы и до настоящего времени исправно снабжают все планеты, включая и Землю, энергией в виде электромагнитного излучения, обеспечивающей на некоторых из них состояние теплового баланса совместимое с поддержанием условий существования белковых форм жизни.

Особенно это касается Земли, атмосфера и магнитное поле которой имеют такую структуру, что, с одной стороны, защищают планету от губительного воздействия коротковолновых высокоэнергетических излучений Солнца, а с другой стороны, пропускают инфракрасный (тепловой), оптический и частично ультрафиолетовый спектр электромагнитного излучения, делая жизнь возможной, как таковой.

Чтобы достичь уровня знаний, позволяющих управлять тем или иным процессом, как правило, необходим некий минимум сведений о предмете управления и не только. В процессе постижения законов Мира на атомном уровне в одной, достаточно узкой области сошлись сразу три процветающих научных направления: **учения об энергии** (все, что связано с теплотой и работой), **электродинамика** (носители заряда и его дискретность) и собственно, **атомная физика**.

Начиная разговор об устройстве атома, целесообразно напомнить, что ещё со времён Демокрита **молекулой считали мельчайшую часть материи, обладающую химическими свойствами данного вещества**. Молекул в природе огромное количество, их число постоянно растёт по мере создания химиками и технологами всё новых и новых соединений.

Атом, мельчайшая частица материи, сохраняющая физические свойства химического элемента. Демокрит полагал мельчайшую, по его мнению, частицу мироздания неделимой, и неизменной во времени, поэтому назвал атомом, что соответствовало переводу с греческого языка.

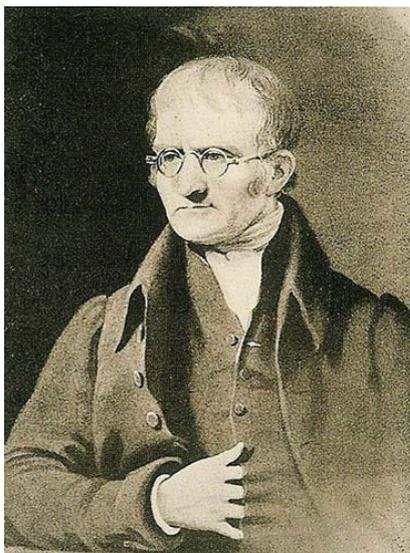


Рис. 3.1. Джон Дальтон

Атомистическая теория Демокрита его учителей и учеников была востребована только в конце XVIII в., начале XIX в., когда английский химик Джон Дальтон (1766 – 1844 гг.) написал про атомную теорию целую книгу, проведя перед этим массу весьма любопытных экспериментов.

В результате своих химических исследований Дальтон (рис. 3.1) установил, что каждый химический элемент представляет собой совокупность атомов вполне определённого вида. Атомы одного вида отличаются от другого своими массами.

Дальтон впервые в истории атомной науки попытался по косвенным признакам оценить эти массы, потому как непосредственные измерения были принципиально невозможны ввиду невообразимой малости объектов исследований.

Речь могла идти только об относительных величинах. Проводя химические исследования, Дальтон мог только установить, что атомы одного вида массивнее атомов другого вида. И это было уже что-то, поскольку об атомах не было известно практически ничего, об их существовании догадывались, к этому были все основания.



Рис. 3.2. Ломоносов М.В.

Наш великий соотечественник Михайло Васильевич Ломоносов (1711 – 1765 гг.) в своих сочинениях описывал мельчайшие неизменные корпускулы, из которых состоят вещества. Идея о дискретности потребовалась и Ньютону при объяснении некоторых оптических явлений.

Другими словами, задача о мельчайших составляющих материального мира возникала во многих областях человеческих знаний и интересов, особенно когда дело касалось освоения новых источников энергии.

Возвращаясь к Дальтону, отметим, что он впервые обратил внимание на то, что вещества соединяются друг с другом только в определённых пропорциях.

Так, например, чтобы образовалась вода, количество водорода по массе должно быть в 8 раз меньше кислорода. Дальтон полагал, что молекула воды (мельчайшая масса) состоит из одного атома кислорода и одного атома водорода. В этом случае, действительно атом кислорода должен быть в 8 раз больше, чем масса атома водорода.

Конечно, Дальтон ошибался, к атому кислорода присоединялись два атома водорода, но идея была замечательной и плодотворной. Позже эту промашку Дальтона устранили, атом водорода уступал по массе атому кислорода в 16 раз, что и нашло своё отражение в таблице Дмитрия Ивановича Менделеева.

В течение всего XIX столетия в химических лабораториях сотнями, если не тысячами повелись эксперименты по определению относительных весов химических элементов и во многом исследователи преуспели.

Химикам удалось определить относительные атомные массы многих химических элементов, некоторые элементы имели целочисленный атомный вес, а другие – целым числом не выражались.

Относительно кислорода с относительным весом 16, атом алюминия весил 27 относительных единиц, кальция – 40, золото – около 197. У целого ряда химических элементов атомный вес выражался числами с долями, например, хлор – 35,5, медь – 63,5, железо – 55,8 и т.д.

В течение всего XIX в. химики так и не разобрались, почему у веществ наблюдаются как целочисленные, так и не целочисленные веса. На научную сцену сценарий исследования микромира потребовал выхода на первые роли комплекса знаний об электричестве. Успехи исследования атомных структур стали напрямую зависимы от учения об электрических и магнитных явлениях.

Это было время, когда к электричеству перестали относиться как к не серьёзной забаве. Уже перестали бредить воскрешением мертвецов, уже перестали забавляться умерщвлением мелких животных и поджиганием легковоспламеняющихся предметов.

Именно в конце XVIII в. установили, что электрический ток, полученный в химических источниках Вольты, при протекании по жидким, твёрдым и газообразным телам меняет их свойства, кроме того, электрический ток нагревает провода и создаёт вокруг них магнитное поле. Другими словами протекание электрического тока сопровождалось структурными изменениями сред. А иначе, откуда взяться сопровождающим течение эффектам?

Англичанин Фарадей (рис. 3.3), тоже их химиков, отметил, что определённая порция электричества, протекая через различные вещества, приводит в движение одно и то же количество атомов, причём для некоторых веществ освобождалось, только половина атомов от расчётного числа, а для иных, всего треть.

Это можно было объяснить только тем, что электричество, как и прочая материя имеет дискретную структуру.

Выяснилось, что атомы различных веществ могут присоединять к себе две или даже три единицы электричества. Если атом способен прикрепить к себе одну единицу, то, например 18 единиц могут освободить 18 атомов, если две единицы, то освобождённых окажется всего 9.

Электрические заряды вели себя по разному, они перемещались к разным электрическим полюсам. Условно их разделили на положительные и отрицательные носители заряда. Получалось, что притягивание отрицательных носителей делает атомы заряженными отрицательно, и они движутся к положительному электроду. В противном случае при потере отрицательного заряда нейтральный атом становится положительным ионом и притягивается силами Кулона к отрицательному электроду.

В 1891 г. ирландский физик Джордж Стоун предложил предполагаемую единицу электрического заряда назвать «электрон». Так в древней Греции называли янтарь, с которым впервые начал экспериментировать Фалес Милетский.

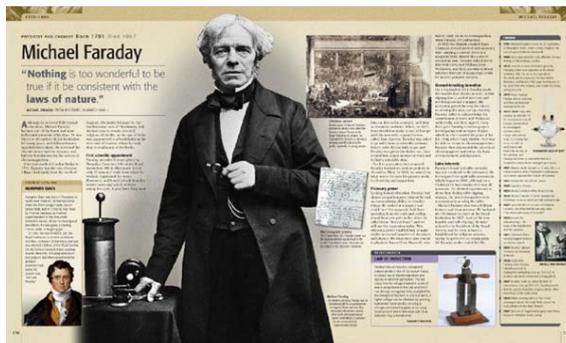


Рис. 3.3. Майкл Фарадей

Как было показано в предыдущем разделе, посвящённом возникновению направленного движения носителей заряда, электрический ток возникает в средах обладающих свободными носителями заряда, как например, в металлах или жидкостях.

Если в среде свободные носители заряда отсутствуют, то течение тока не наблюдается. Было условно принято, клемма с избытком положительного заряда считается **анодом**, а вторая клемма – **катодом**.

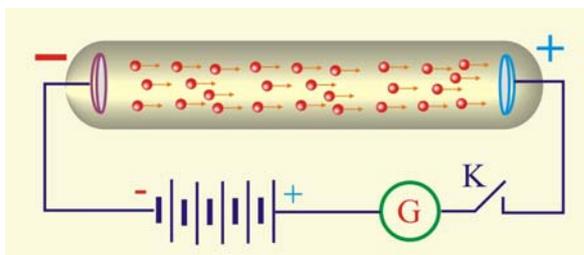


Рис. 3.4. Трубка Гейслера

Но было обнаружено, что электрический ток мог возникать в откачанной стеклянной колбе, между впаянными в неё двумя электродами, если между ними создать высокую разность потенциалов (рис. 3.4).

Впервые такое устройство удалось получить в 1854 г. немецкому стеклодуву Генриху Гейслеру, такие

вакуумированные трубки с электродами стали впоследствии носить его имя. Наличие тока в откачанной трубке, не содержащей свободных носителей заряда, было явлением более чем странным.

Почему гальванометр G фиксирует течение зарядов по цепи? Откуда они берутся? Вывод напрашивался в некоторой степени фантастический. Выходило, что материал отрицательного электрода трубки генерировал носители заряда, причём отрицательные, потому, что они двигались к положительному электроду, к аноду. Экспериментаторы, поведя измерения в тёмной комнате, обнаружили, что при возникновении тока в трубке в области катода возникало зеленоватое свечение стекла, из которого были изготовлены вакуумные приборы.

Немецкий исследователь Ойген Гольдштейн в 1876 г. впервые запустил в оборот термин «катодные лучи», предположив одновременно, что носителями тока выступают те же частички материи, что и в проводниках.

Однако было и другое мнение, в соответствии с которым катодные лучи следовало рассматривать с волновых позиций, как электромагнитное поле, подобно видимому свету.

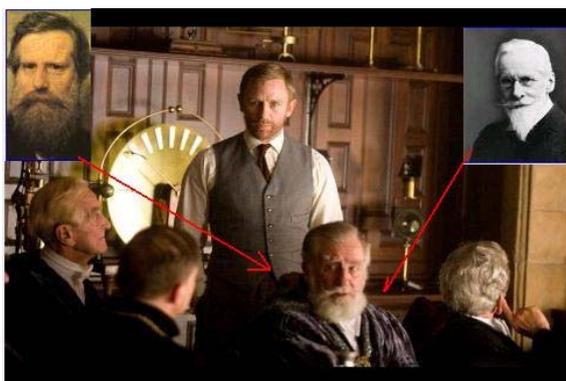


Рис. 3.5 Уильям Крукс с коллегами

Встал очередной вопрос, частицы или волны? Убедительно ответил на него англичанин Уильям Крукс (рис. 5.3), который на пути катодных лучей поставил лёгкую турбинку, при протекании тока она поворачивалась.

Из этого следовало, что «электричество» обладает кинетической энергией, которую передаёт лопастям.

Другими словами электрический ток представлял собой поток движущихся частиц, несущих на себе электрический заряд и обладающих мас-

сой. Иначе откуда же взяться кинетической энергии?

Крукс, будучи человеком любознательным и талантливым, развил свои эксперименты. Он установил, что катодные лучи отклоняются постоянным магнитом, т.е. установил наличие силы Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]; \quad |\vec{F}_L| = qvB\sin(\vec{v}; \vec{B}),$$

где q – величина электрического заряда, \vec{v} – вектор скорости заряда, \vec{B} – вектор магнитной индукции. Эти данные позволили сделать два очень важных вывода: во-первых, катодные лучи являются частицами, обладающими массой, во-вторых, эти частицы несут отрицательный заряд.

Образ катодных лучей как поток отрицательно заряженных частиц подтвердил Английский физик Джозеф Джон Томсон, который 1895 г. показал, что этот поток отрицательно заряженных частиц, как ему и подобает, искривлялся под действием электрического поля.

Наблюдая направление отклонения, Томсон пришёл к заключению, что частицы несут отрицательный заряд, что подтвердило гениальную догадку Майкла Фарадея о существовании единиц электрического заряда.

Томсон в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета начал планомерные количественные исследования отклонения катодных лучей электрическими и магнитными полями.

Итоги своих наблюдений Томсон обобщил в статье журнала «Philosophical Magazine», где высказал утверждение, что частицы, образующие катодные лучи входят в состав вещества, из которого изготавливался катод.

Это был весьма смелый вывод, потому что, по сути, **Томсон, утверждал, что существуют некие частицы вещества меньшие по размерам, чем атом, а сам атом при определённых условиях может дробиться.** Томсон стал первым учёным открывшим, как теперь говорят, элементарный электрический заряд и установил делимость атома на более мелкие отдельные фрагменты.

Работы Томсона положили конец длительным спорам о делимости атома. Исследуя физические свойства катодных лучей (потока электронов) Томсон вычислил удельный заряд электрона, т.е. количественно определил отношение заряда электрона к его массе. Это было осуществлено на установке, показанной на рис.3.7.

Томсон снабдил свою трубку катодом и двумя ускоряющими электродами и в виде круглых пластинок с отверстиями в центре, что позволило придать заряженным частицам, испускаемым катодом дополнительную скорость и получать достаточно узкий пучок.

На плоскую торцевую поверхность трубки, противоположащей катоду, была нанесена тонкая плёнка сернистого цинка (ZnS), способная световыми мерцаниями обозначать место падения на неё частиц.

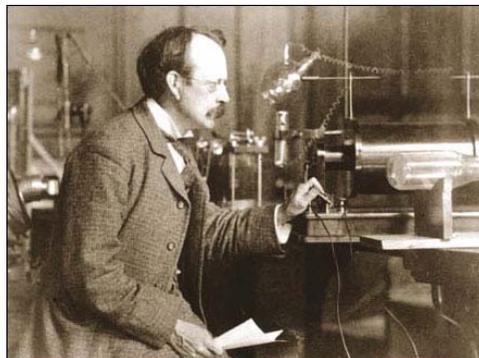


Рис. 3.6. Дж. Дж. Томсон в лаборатории



Рис. 3.7. Катодная трубка Томсона для определения удельного заряда электрона

По сути, это был прообраз современной электронно-лучевой трубки (кинескопа), которая до недавнего времени была широко распространена в устройствах научного и бытового назначения.

В трубке по ходу движения потока заряженных частиц были расположены пластины плоского конденсатора две симметричные катушки индуктивности для создания в пространстве между пластинами магнитного поля.

Прежде чем начать обсуждение полученных Томсоном фундаментальных результатов рассмотрим некоторые особенности движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях.

Движение в однородном электрическом поле. Пусть частица массой m , несущая положительный заряд q , двигаясь с постоянной скоростью v_0 , попадает в пространство между пластинами воздушного конденсатора с напряжённостью E . В данном случае уравнение движение частицы можно найти из уравнения II закона Ньютона

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

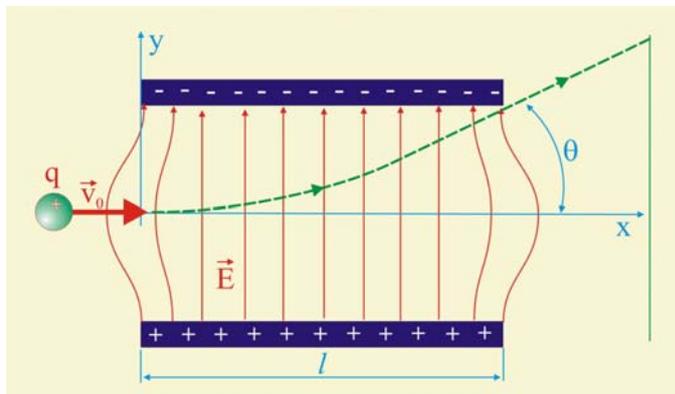


Рис. 3.8. Движение частицы в электростатическом поле

Если оси координат выбрать так, как показано на рис. 3.8, то проекции вектора напряжённости будут равны: $E_x = E_z = 0$, $E_y = E$, следовательно Сила Кулона, действующая на положительно заряженную частицу будет направлена вертикально вверх. Это даёт основание записать векторное уравнение второго закона Ньютона в виде системы

двух скалярных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= 0, \\ \frac{dv_y}{dt} &= \frac{q}{m} E. \end{aligned} \right\}$$

Рассматриваемая задача движения заряда аналогична задаче о горизонтальном броске тела в поле земного тяготения. Это позволяет предположить, что частица будет двигаться по параболической траектории. Интегрирование системы уравнений приводит к результату

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = \text{const} = v_0; \\ v_y &= \frac{q}{m} Et + C. \end{aligned} \right\}$$

В данном случае $t = \ell/v_0$ – есть время пребывания частицы в электрическом поле, C – постоянная интегрирования. В момент времени $t = 0$ $v_y = 0$, следовательно $C = 0$, поэтому

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{q}{m} E \frac{\ell}{v_0}.$$

Угол отклонения частицы θ при её выходе из электрического поля определится как

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{dy}{dx} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{q \ell E}{m v_0^2}.$$

Как видно из полученного уравнения, угол отклонения θ зависит от удельного заряда частицы q/m , чем и воспользовался Дж. Дж. Томсон при определении удельного заряда электрона.

Выберем систему координат таким образом, чтобы направление поля совпадало с направлением отрицательной оси y (рис. 3.9). В начальный момент времени $t = t_0$ заряд начинает двигаться из точки с радиус-вектором \vec{r}_0 , имея начальную скорость \vec{v}_0 . Уравнения движения в этом случае можно записать следующим образом

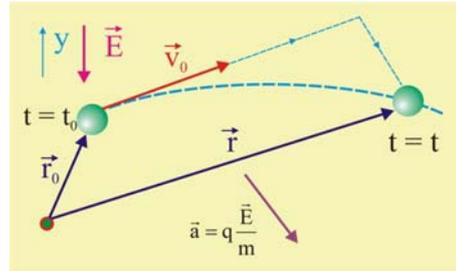


Рис. 3.9. Траектория движения заряда

$$\vec{a} = q \frac{\vec{E}}{m},$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = q \frac{\vec{E}}{m} t + \vec{v}_0,$$

откуда, после интегрирования, имеем:

$$\vec{r} = \frac{1}{2} q \frac{\vec{E}}{m} t^2 + \vec{v}_0 t.$$

Эти уравнения разлагаются на компоненты в виде проекций на оси декартовой системы координат

$$\left. \begin{aligned} a_x &= 0; \\ a_y &= -q \frac{E}{m}; \\ v_x &= v_{x(0)}; \\ v_y &= -q \frac{E}{m} t + v_{y(0)}; \\ x &= v_{x(0)} t; \\ y &= -\frac{1}{2} q \frac{E}{m} t^2 + v_{y(0)} t. \end{aligned} \right\}$$

Уравнения системы позволяют вычислять все кинематические параметры движения зарядов в электрическом однородном поле. В частности, уравнение траектории можно получить, исключая время из двух последних уравнений системы путём подстановки $t = x/v_{x(0)}$

$$y = -\frac{1}{2} q \frac{E}{m} \frac{x^2}{v_{x(0)}^2} + \frac{v_{y(0)}}{v_{x(0)}} x,$$

что подтверждает предположение о параболической форме траектории. Рассмотрим далее несколько частных случаев движения.

Начальная скорость равна нулю. Это означает, что частица стартует из состояния покоя, уравнения движения примут вид

$$\left. \begin{aligned} a_y &= -q \frac{E}{m}; \\ v_y &= -q \frac{E}{m} t; \\ y &= -\frac{1}{2} q \frac{E}{m} Et^2. \end{aligned} \right\}$$

Уравнения соответствуют механическому случаю свободного падения. Если расстояние между обкладками равно d , то время падения частицы между пластинами составит

$$t_d = \sqrt{2d \frac{m}{q} \frac{1}{E}}.$$

Двигаясь от пластины к пластине с ускорением a_y , частица приобретает кинетическую энергию, которую отдаёт при соударении, тем самым, производя разогрев поверхности. Если в месте падения частицы сделать отверстие, то пролетевшая через него частица будет двигаться далее с постоянной конечной скоростью. Конечное значение энергии частицы определится следующим соотношением

$$\frac{mv_y^2}{2} = \frac{m(a_y t_d)^2}{2} = \frac{1}{2} m \frac{q^2 E^2}{m^2} 2d \frac{m}{q} \frac{1}{E} = qEd = qU,$$

где U – разность потенциалов между пластинами. Таким образом, в полном соответствии с законом сохранения энергии произошло преобразование потенциальной энергии частицы $\Pi = qU$ в кинетическую энергию, которая затем после соударения рассеивается в виде тепла.

Конечная скорость частицы в момент достижения пластины составит величину

$$v_y = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Как видно из уравнения конечные скорости частиц с одинаковым зарядом, но разными массами будут отличаться. Так, например, если в потоке ускоряется смесь различных по массе ионов с одинаковым зарядом, то, пройдя вторую пластину, они пролетят разные горизонтальные расстояния.

Начальная скорость перпендикулярна электрическому полю. Этот случай движения частицы соответствует горизонтальному броску тела массой m в поле силы тяжести. Уравнения движения для этого случая запишутся следующим образом

$$\left. \begin{aligned} x &= v_{x(0)} t; \\ y &= \frac{1}{2} q \frac{E}{m v_{x(0)}} t^2. \end{aligned} \right\}$$

Уравнение траектории в этом случае принимает вид

$$y = \frac{1}{2} q \frac{E}{m v_{x(0)}^2} x^2.$$

Рассмотрим далее отклонение пучка электронов, ускоряемых разностью потенциалов U_b и влетающих в пространство между двумя горизонтальными пластинами, между которыми установлена разность потенциалов U_a .

На расстоянии L от середины пластин (рис. 3.10) установлен вертикальный флуоресцентный экран, регистрирующий в виде светового пятна место падения электронов.

С учётом принятых на рис. 3.10 обозначений можно для угла отклонения α записать следующее уравнение

$$\operatorname{tg} \alpha = \left[\frac{dy}{dx} \right]_{x=\ell} = \left[\frac{q}{m} \frac{E}{v_{x(0)}^2} x \right]_{x=\ell} = q \frac{E \ell}{m v_{x(0)}^2}.$$

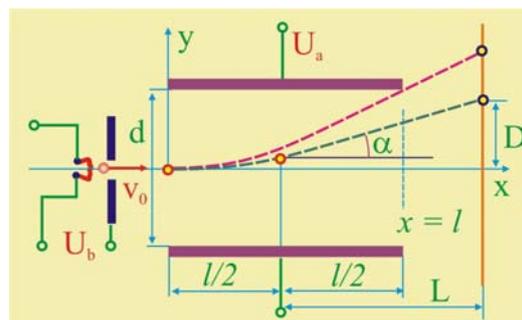


Рис. 3.10. Электростатическое отклонение

С учётом того, что касательная к траектории пересекает ось x в точке $x = l$ уравнение касательной примет вид

$$y = \operatorname{tg} \alpha \left(x - \frac{\ell}{2} \right) = q \frac{E}{m v_{x(0)}^2} \ell \left(x - \frac{\ell}{2} \right),$$

следовательно, отклонение D будет составлять

$$D = q \frac{E}{m v_{x(0)}^2} \ell L.$$

Значение начальной скорости электронов определится величиной ускоряющей разности потенциалов U_b

$$v_{x(0)} = \sqrt{\frac{2q}{m} U_b}.$$

Разность потенциалов между отклоняющими пластинами даёт основание для определения напряжённости электрического поля $E = U_a/d$. Окончательное отклонение, таким образом, представится следующим образом

$$D = \frac{\ell U_a L}{2d U_b}.$$

Следует заметить, что отклонение частицы не зависит от заряда и массы частицы, а определяется исключительно значениями разгонного и отклоняющего потенциала.

Движение заряда в однородном магнитном поле. Для однородного магнитного поля уравнение движения заряженной частицы можно представить используя уравнение силы Лоренца

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

(3.23)

В данном случае сила, действующая на заряженную частицу, всегда направлена, перпендикулярна вектору скорости, поэтому она оказывает влияние только на направление вектора скорости. Умножим правую и левую часть уравнения (3.23) на вектор скорости \vec{v}

$$m \vec{v} \frac{d\vec{v}}{dt} = q \vec{v} (\vec{v} \times \vec{B}) = 0,$$

откуда видно, что

$$\frac{d\vec{v}^2}{dt} = 0; \Rightarrow \vec{v}^2 = \text{const}; \Rightarrow |\vec{v}| = \text{const}.$$

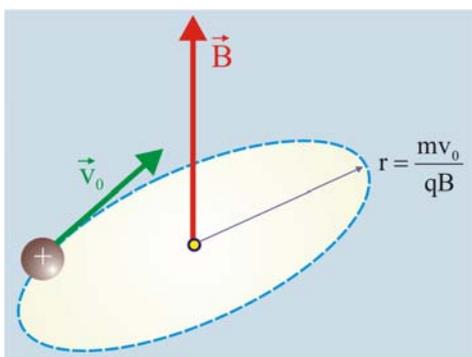


Рис. 3.11. Частица в однородном магнитном поле

Пусть положительно заряженная частица массой m влетает в магнитное поле, так что вектор её начальной скорости \vec{v}_0 перпендикулярен вектору магнитной индукции \vec{B} (рис. 3.11). Д

вижение частицы, с позиций механики, будет являться плоским. Частица будет двигаться в плоскости перпендикулярной вектору индукции. Модуль скорости остаётся, таким образом постоянным, меняется только направление, т.е. движение по круговой траектории будет ускоренным, причём нормальное ускорение определится как

$$a_n = \frac{mv^2}{r} = qvB,$$

откуда, в частности, можно определить радиус стационарной орбиты частицы

$$r = \frac{mv}{qB},$$

и период обращения частицы

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB},$$

частоту и циклическую частоту вращения

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{qB}{m}.$$

Следует отметить, что угловая скорость частицы не зависит от её линейной скорости, а определяется исключительно массой частицы и индукцией (напряжённостью) магнитного поля. Определим далее энергию вращающейся частицы

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} m \left(\frac{qBr}{m} \right)^2 = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}.$$

Рассмотрим далее движение отрицательно заряженной частицы (электрона) через пространство, занятое однородным магнитным полем, т.е. максимально приблизим задачу к условиям экспериментов Дж. Дж. Томсона (рис. 3.12)

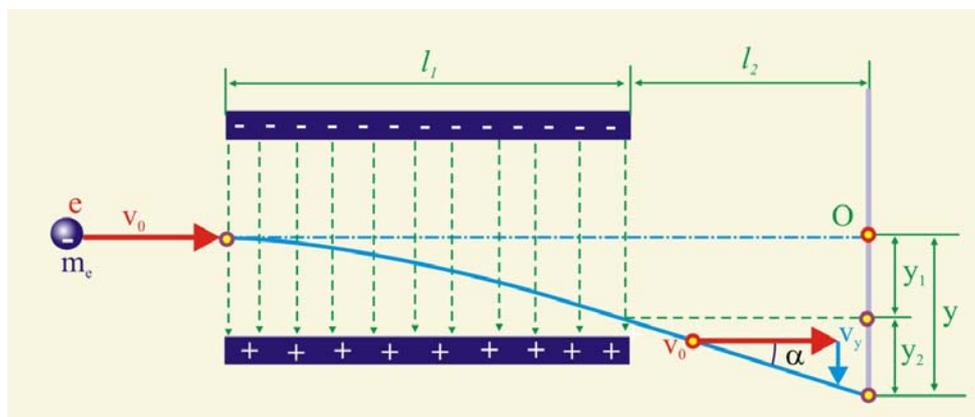


Рис. 3.12. Движение электрона в пространстве между пластинами конденсатора

Пусть пучок электронов в отсутствие электрического поля попадает на плоский перпендикулярный экран в точке O . Найдём смещение следа пучка при про-

хождении им однородного электрического поля протяжённостью l_1 , линии напряжённости которого перпендикулярны вектору начальной скорости v_0 .

Вертикальная составляющая ускорения a_y определится как

$$a_y = \left(\frac{e}{m_e} \right) E,$$

где (e/m_e) – удельный заряд электрона, E – напряжённость электрического поля. Перемещение электронов в присутствии поля продолжается в течении времени

$$t = \frac{\ell_1}{v_0}.$$

За время t электроны на экране по вертикали сместятся на расстояние

$$y_1 = \frac{a_y t^2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m_e} \right) t^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m_e} \right) E \frac{\ell_1^2}{v_0^2},$$

приобретая, при этом, вертикальную составляющую скорости

$$v_y = a_y t = \left(\frac{e}{m_e} \right) E \frac{\ell_1}{v_0}.$$

После выхода из области пространства, занятого электрическим полем электроны будут двигаться прямолинейно со скоростью, составляющей с вектором \vec{v}_0 угол α

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_0} = \left(\frac{e}{m_e} \right) E \frac{\ell_1}{v_0^2}.$$

Пучок электронов, при этом получает дополнительное вертикальное смещение

$$y_2 = \ell_2 \operatorname{tg} \alpha = \left(\frac{e}{m_e} \right) E \frac{\ell_1 \ell_2}{v_0^2},$$

где ℓ_2 – расстояние от области, занятой полем до экрана (рис.3. 12). Полное смещение луча, таким образом, определится как

$$y = y_1 + y_2 = \left(\frac{e}{m_e} \right) E \frac{\ell_1}{v_0^2} \left(\frac{\ell_1}{2} + \ell_2 \right).$$

Подставляя в последнее уравнение значение y_2 , получим

$$y = \left(\frac{1}{2} \ell_1 + \ell_2 \right) \operatorname{tg} \alpha.$$

Предположим далее, следуя конструкции трубки Дж. Дж. Томсона, что на участке движения электронов, протяжённостью l_1 начинает действовать перпендикулярное вектору начальной скорости однородное магнитное поле.

Другими словами вектор индукции магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости рис. 3.13 (границы магнитного поля показаны пунктирной окружностью).

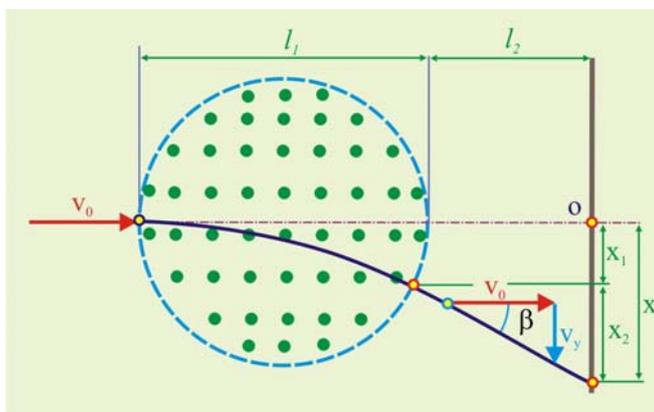


Рис. 3.13. Электроны в магнитном поле

При прохождении области пространства, занятого магнитным полем, электроны получают вертикальную составляющую ускорения a_y

$$a_y = \left(\frac{e}{m_e} \right) v_0 B,$$

Считая вертикальное ускорение постоянным по величине и направлению и добываясь на экране смещения отклонения пучка от действия магнитного поля с отклонением от электрического поля, можно записать

$$\left(\frac{e}{m_e} \right) E = \left(\frac{e}{m_e} \right) v_0 B.$$

В этом случае для смещения x справедливо следующее соотношение

$$x = \left(\frac{e}{m_e} \right) B \frac{\ell_1}{v_0} \left(\frac{1}{2} \ell_1 + \ell_2 \right).$$

Угол отклонения электронного пучка магнитным полем β представится в виде

$$\operatorname{tg} \beta = \left(\frac{e}{m_e} \right) B \frac{\ell_1}{v_0}.$$

Перепишем далее уравнение для x с учётом последнего соотношения

$$x = \left(\frac{1}{2} \ell_1 + \ell_2 \right) \operatorname{tg} \beta.$$

Как видно из полученных уравнений действием магнитного поля можно было смещать электронный пучок по вертикали экрана на расстояние x , а затем, включая электрическое поле, возвращать его в центр экрана, куда попадали электроны свободные от действия полей.

Таким образом Дж. Дж. Томсон пришёл к системе двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} x &= \left(\frac{e}{m_e} \right) B \frac{\ell_1}{v_0} \left(\frac{1}{2} \ell_1 + \ell_2 \right); \\ eE &= ev_0 B. \end{aligned} \right\},$$

решая которые совместно относительно (e/m_e) он вычислил удельный заряд электрона. В результате измерений была определена величина удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m_e} \approx 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

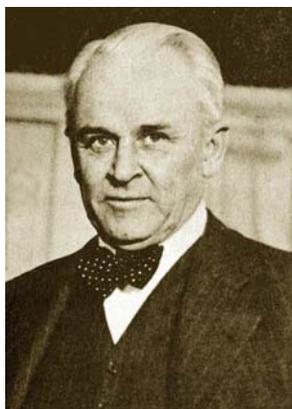


Рис. 3.14. Р. Милликен

Непосредственное измерение заряда электрона было проведено в 1909 г. Робертом Эндрю Милликемом на установке, схема которой приведена на рис. 3.15.

Идея эксперимента гениальна и проста. В пространство между пластинами обычного воздушного конденсатора с вырезом в верхней обкладке посредством обычного пульверизатора 5 впрыскивались капельки масла. В случае наличия на капельках 7 электрического заряда они могли двигаться в электрическом поле конденсатора против силы тяжести или останавливаться, в зависимости от величины и направления напряжённости поля конденсатора.

Конструкция установки позволяла измерять давление газа I внутри герметичного объёма. Специальная трубка 2 давала возможность изменять давление и состав газообразной среды. Капельки масла освещались лампочкой, расположенной в осветити 3 и наблюдались в микроскоп.

Термостабилизация установки осуществлялась размещением измерительного газового объёма и бак, заполненный маслом 4 . Через специальное кварцевое окно 6 на капли можно было воздействовать ультрафиолетовым и рентгеновским излучением. Облучая медленно оседающие капельки масла рентгеновскими лучами (на самом деле это более волна, чем лучи в обычном понимании), Милликен добивался выбивания наружных электронов со сферической поверхности капель.

Капли, таким образом, приобретали положительный электрический заряд. Выделив одну из заряженных капель масла, Милликен наблюдал в окуляре микроскопа за её неспешным падением под действием силы тяжести (сила Архимеда тоже имеет место быть). Сила тяжести капли преодолевала ко всему прочему и силу сопротивления со стороны газовой среды, которая, кстати, в данном случае пропорциональна скорости в первой степени

$$mg = kv_0,$$

где m – масса капли, g – ускорение силы тяжести, k – постоянный коэффициент, зависящий от сопротивления среды, v_0 – скорость, при которой сила тяжести уравновешивается силой сопротивления. Сила сопротивления сферических тел при их неспешном движении в ламинарном режиме обтекания определяется законом Стокса

$$F_R = 6\pi\eta r_0 v_0,$$

где η – коэффициент, характеризующий внутреннее трение в газе (коэффициент вязкости), r_0 – радиус капли, измеряемый микроскопом. Если вместо mg подставить значение F_R из уравнения то для коэффициента k можно записать соотношение

$$k = 6\pi\eta r_0.$$

Скорость установившегося движения можно записать так:

$$v_0 = \frac{mg}{k} = \frac{mg}{6\pi\eta r_0}.$$

Выразим далее массу капельки через её размер и плотность масла ρ_0

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho_0 r_0^3,$$

что даёт основание уравнение для скорости установившегося движения переписать следующим образом

$$v_0 = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3 g}{3 \cdot 6\pi\eta r_0} = \frac{2}{9} r_0^2 \frac{\rho_0}{\eta} g.$$

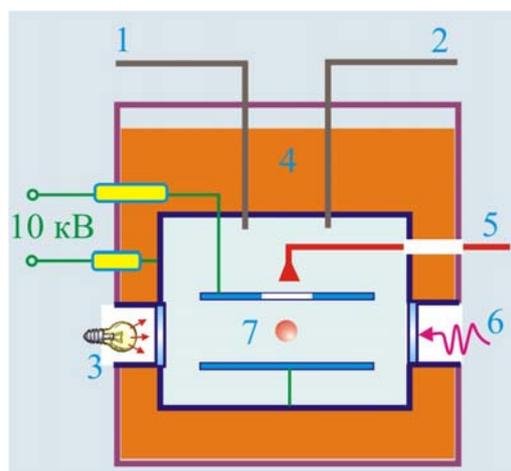


Рис. 3.15. Установка Милликена для измерения заряда электрона

Записанные выше уравнения не учитывают силу Архимеда, которая уравнение откорректирует следующим образом

$$6\pi\eta r_0 v_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3(\rho_0 - \rho)g,$$

где ρ – плотность газа. При подаче на обкладки конденсатора электрического напряжения на заряженную каплю начинает дополнительно действовать сила Кулона

$$\frac{4}{3}\pi r_0^3(\rho_0 - \rho)g \pm QE.$$

Знак \pm подчёркивает возможность изменять направление электрического поля. Если вектор напряжённости электрического поля совпадает с направлением силы тяжести, то конечная скорость установившегося движения капли определится уравнением

$$6\pi\eta r_0 v = QE + \frac{4}{3}\pi r_0^3(\rho_0 - \rho)g = QE + 6\pi\eta r_0 v_0.$$

Последнее уравнение, с учётом линейности зависимости скорости капли от напряжённости поля, можно разрешить относительно заряда капли

$$Q = \frac{6\pi\eta r_0}{E}(v - v_0).$$

В результате многочисленных экспериментов Милликен выяснил, что заряд отдельных капель кратен наименьшему количеству электричества

$$Q = nq_e \equiv ne, \quad (n = 1, 2, \dots).$$

Оказалось, что $e = 1,6022 \cdot 10^{-16}$ Кл. В естественном состоянии капля масла падала со скоростью $v_0 \approx 1,09 \cdot 10^{-6}$ м/с, т.е. в полном соответствии с полученным уравнением. При лишении её под действием рентгеновского излучения двух электронов, её падение происходило с большей скоростью $9,5 \cdot 10^{-5}$ м/с, причём изменение скорости происходило за время меньшее, чем 10^{-6} с, т.е. практически мгновенно.

Определение абсолютного значения заряда электрона, как наименьшего, обнаруженного в природе, позволило многие физические процессы, связанные с движением заряженных частиц рассматривать на количественной основе. **Кроме того, данные полученные Дж. Дж. Томсоном и Робертом Милликеном позволили вплотную приблизиться к созданию структурной модели атома.**

Используя данные Томсона и данные Милликена, возможно вычислить массу электрона

$$m_e \approx \frac{1,6022 \cdot 10^{-19}}{1,76 \cdot 10^{11}} \approx 9,1034 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \approx 1 \cdot 10^{-30} \text{ кг}.$$

Чтобы получить массу одного самого лёгкого атома водорода необходимо просуммировать массы 1837,11 электронов.

И так, благодаря стараниям Томсона и Милликена задача об элементарном электрическом заряде была решена, измерена масса и заряд электрона и установлено, что эта самая маленькая частица электричества существенно меньше атома и является его составной частью.

Кто были эти два великих исследователя структурных особенностей микромира? Как они достигли таких поразительных результатов.

Вначале несколько слов о Джозефе Джоне Томсоне, который родился 18 декабря 1856 г. в пригороде Манчестера в семье книготорговца. Отец Томсона по тем временам был достаточно образованным человеком, ремесло обязывало.

Джозеф инженерное образование получил в Оуэнс-колледже (в настоящее время Манчестерский университет). В отличие многих других колледжей в Оуэнс-

колледже читался курс экспериментальной физики, из которого Томсон узнал много нового и увлёкся идеями и методами физических исследований.

Получив звание инженера Томсон поступил в знаменитый Тринити колледж, где изучал математику и теоретическую физику. Получив степень бакалавра по математике Томсон начал работать в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета. Кстати, в Тринити колледже в своё время учился великий Ньютон.

Руководитель лаборатории, приемник Джеймса Клерка Максвелла Уильям Стретт (Рэлей) уходя в отставку, рекомендовал вместо себя двадцати семи летнего Томсона.

Рэлей рассмотрел в начинающем учёном задатки большого учёного, достойного продолжателя теоретического наследия Максвелла. Томсон был специалистом в электродинамике Максвелла, Герца, Хевисайда и один из немногих, кто оценил все перспективы этой теории. Томсон возглавил серию работ по изучению прохождения электрического тока через газообразные среды, в частности, в трубках с высокой степенью вакуумирования.

Этот интерес был оправдан отсутствием единого мнения о свойствах катодных лучей. Одна часть учёных считала их природу волновой, другая – корпускулярной. Так, например, Генрих Герц на основании собственных опытов сделал вывод об отсутствии влияния на катодные лучи электрических полей, что говорило, по его мнению, о волновой природе излучения.

Томсон повторил у себя в лаборатории опыты Герца и установил, что отсутствие влияния было вызвано большим количеством остаточного газа в трубках Герца. Освоив технологию качественного откачивания, Томсон утвердился в мнении о влиянии электрических полей на траекторию движения катодных лучей.

В одной из своих работ Томсон писал: «Отклонение катодных лучей электрическими силами стало вполне различимым, а его направление указывало на то, что составляющие катодные лучи частицы несли отрицательный заряд. Этот результат устраняет противоречие между воздействием электрических и магнитных сил на катодные частицы. Но он имеет гораздо большее значение. Здесь возникает способ измерения скорости этих частиц v , а также и e/m , где m – масса частицы, а e – ее электрический заряд».

Томсон обнаружил, что удельный заряд частиц (корпускул) электричества не зависит от материала катода, кроме того, поток катодных лучей удалось выделить из нагретого угля и металлов, облучаемых ультрафиолетовыми лучами.

Отсюда следовал вывод: «Атом – не последний предел делимости материи; мы можем двигаться дальше – к корпускуле, и эта корпускулярная фаза одинакова, независимо от источника ее возникновения... Она, по всей видимости, входит составной частью во все разновидности материи при самых разных условиях, поэтому кажется вполне естественным рассматривать корпускулу как один из кирпичиков, из которых построен атом».

На основании результатов своих исследований Томсон впервые предложил модель атома. Несмотря на то, что эта модель просуществовала совсем не долго и была вытеснена планетарной моделью Эрнста Резерфорда (любимого ученика и последователя Дж.Дж.) её роль трудно переоценить, потому что она была первой и дала стимул дальнейшим размышлениям и экспериментам на эту тему.

За цикл теоретических и экспериментальных фундаментальных работ по физике Дж.Дж. Томсон в 1906 г. получил Нобелевскую премию.

Как было отмечено при награждении: «Томсон дал миру несколько главных трудов, позволяющих натурфилософу нашего времени предпринять новые исследования в новых направлениях, показав, что атом не является самой последней не-

делимой частицей материи, как это долго считали, он своими открытиями открыл дверь в новую эру физической науки».

В 1918 г. Томсон возглавил Тринити колледж, а Кавендишскую лабораторию передал своему ученику Эрнсту Резерфорду. У Томсона было двое детей, причём сын получил в 1937 г. Нобелевскую премию по физике. Кроме сына ещё шесть учёных, работавших в Кавендишской лаборатории получили в разное время Нобелевские премии. Умер Томсон в 1940 г. и был похоронен в Вестминстерском аббатстве в Лондоне.

Роберт Эндрюс Милликен (1868 – 1953 гг.) был уникальным за всю историю науки измерителем. Он измерил заряд электрона и экспериментально определил величину постоянной Планка.

Эти два измерения многого стоят, кто понимает. Свою карьеру физика Милликен начал с преподавания. Получив степень бакалавра в колледже Огайо по классике – языку, философии, истории и искусству древнего средиземноморья.

Роберт пообещал вести курс физики на подготовительном отделении. Вот как он комментирует резкую смену своего амплуа: «В последний год обучения мой профессор по греческому попросил меня прочесть курс по элементарной физике в подготовительном отделении в следующем году. На мой ответ, что я ничего не знаю из физики, он ответил, что любой, кто смог получить у меня хорошую отметку по греческому, может преподавать физику.

Хорошо – ответил я – под вашу ответственность я попробую и посмотрю, что из этого получится. Сразу после этого я купил книгу Эвери «Начала физики» и провёл большую часть летних каникул 1889 г. дома, пытаясь вникнуть в предмет. Сомневаюсь, преподавал ли я лучше когда-либо в моей жизни, чем во время того моего первого курса по физике в 1889 г. Я был настолько заинтересован в том, чтобы знать больше, чем мои ученики, что они наверно подхватили часть моего интереса и энтузиазма».

Администрация колледжа конспект лекций по физике Милликена отправила на рецензию в Колумбийский университет. Помимо весьма лестного отзыва о содержании курса администрация университета пригласила Милликена в аспирантуру с правом получения государственной стипендии.

Будучи аспирантом Милликен некоторое время работал под руководством Майкельсона, прославившегося измерением скорости света. Эта встреча окончательно сформировала убеждение Роберта в том, что физика является его призванием. В 1895 г. Милликен в Колумбийском университете защитил докторскую диссертацию по физике и был командирован на стажировку в Европу, где встречался с Анри Беккерелем, Максом Планком, Вальтером Нерстом и Анри Пуакаре. Это были встречи с целым научным созвездием гениев, позволившие познакомиться с самыми передовыми идеями физики.

По возвращении в 1896 г. в Америку Милликен стал ассистентом Майкельсона в Чикагском университете. Развивая свой первый конспект лекций, Майкельсон написал несколько учебников по физике, которые стали первыми американскими учебниками для школьников, бакалавров и магистров, до Милликена в ходу были только переводные книги с немецких и французских изданий.

Учебники Милликена были приняты как стандартные для средних школ и колледжей. В дополненных переизданиях эти пособия просуществовали более полувека. В 1910 г. Милликен стал полным профессором Чикагского университета.

Параллельно с писательской и профессорской деятельностью Милликен занимался экспериментальной физикой. Он разработал поразительный по изяществу эксперимент по измерению заряда электрона методом заряженной капли, за что в

1923 г. получил Нобелевскую премию «За работы по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрическому эффекту».

С 1927 г. и до конца своих дней Милликен был председателем исполнительного совета (президентом) Калифорнийского технологического института (знаменитого Калтеха), где смог проявить себя как блестящий администратор, собрав под крышей этого учебного заведения лучших профессоров США, что определило и контингент студенчества. К концу своей научной и административной карьеры Роберт Милликен был членом более двадцати иностранных Академий.

Следующий шаг на пути к постижению тайн атома был сделан немецким профессором Вильгельмом Конрадом Рентгеном в конце 1895 г. Рентген тоже экспериментировал с катодными лучами, категорически, при этом, отрицая понятие электрона как мельчайшей электрической субстанции. Он даже запретил в своей лаборатории произносить это, по его мнению, крамольное слово.

В один из вечеров Рентген, закончив очередную серию экспериментов, закрыл свою установку чёрным картонным кожухом, а питание трубки, с которой он работал, осталось включенным. Учёный обратил внимание на свечение экрана из синеродистого бария, находящегося на лабораторном столе.

После выключения питания катодной трубки свечение прекратилось, повторная подача высокого напряжения на электроды трубки сопровождалась возобновлением свечения. Идея Рентгена о катодных лучах как световых явлениях рушилась у него на глазах.

Проведя серию экспериментов, 28 декабря всё того же 1895 г. Рентген оформил первое сообщение «О новом роде лучей», в котором, в частности, писал: «Кусок бумаги, покрытой платиносинеродистым барием, при приближении к трубке, закрытой достаточно плотно прилегающим к ней чехлом из тонкого черного картона, при каждом разряде вспыхивает ярким светом: начинает флюоресцировать. Флюоресценция видна при достаточном затемнении и не зависит от того, подносим ли бумагу стороной, покрытой синеродистым барием или не покрытой синеродистым барием. Флюоресценция заметна еще на расстоянии двух метров от трубки».

Далее Рентген выяснил, «что черный картон, не прозрачный ни для видимых и ультрафиолетовых лучей солнца, ни для лучей электрической дуги, пронизывается каким-то агентом, вызывающим флюоресценцию». Учёный выяснил, что «X – лучи», как он впоследствии назвал открытый им «агент», проходят через бумагу, дерево, эбонит, тонкие слои металлов, но сильно задерживаются свинцом.

Следующая публикация Рентгена была посвящена сенсационному опыту по прохождению X – лучей через живую ткань человеческого организма (рис. 3.17): «Если держать между разрядной трубкой и экраном руку, то видны темные тени костей в

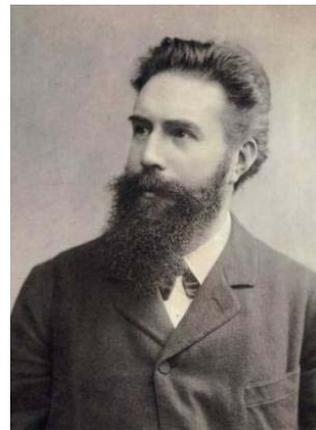


Рис. 3.16. Конрад Рентген



Рис. 3.17. Прохождение X – лучей через живые ткани

слабых очертаниях тени самой руки».

После первых же опытов Рентгену стало очевидно, что он имеет дело не с катодными лучами. X – лучи не реагировали ни на магнитное поле, ни на электрическое поле, т.е. они не несли электрического заряда.

Причиной же возбуждения этого излучения были всё-таки катодные лучи, а источником лучей было стекло катодной трубки. Рентген обнаружил способность металлов генерировать X – лучи.

Через пять лет после открытия X – лучей Вильгельм Конрад Рентген был удостоен первой нобелевской премии по физике. После открытия X – лучей Рентген в течение семи недель не выходил из своей лаборатории.

Он велел поставить в лаборатории кровать и туда же приносить еду, чтобы не терять понапрасну времени на переходы. Затворничество закончилось обнародованием фотографии руки жены Рентгена Берты (рис. 3.17) в специальном сообщении отправленном на имя председателя Физико-медицинского общества Вюрцбургского университета, где профессорствовал Рентген.

Следует заметить, что продолжение исследований X – лучей Рентгена ознаменовалось присуждением ещё семи Нобелевских премий:

- В 1914 г. Макс фон Лауэ за открытие дифракции рентгеновских лучей;
- В 1915 г. отцу и сыну Брэггам за изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей;
- В 1917 г., Ч. Баркле за открытие характеристического рентгеновского излучения;
- В 1924 г. К. Сигбану за исследования спектров в диапазоне рентгеновских лучей;
- В 1927 г. А. Комптону за открытие рассеяния рентгеновских лучей на свободных электронах вещества;
- В 1936 г. П. Дебаю за вклад в изучение молекулярных структур с помощью дифракции рентгеновских лучей и электронов;
- В 1979 г. Г. Хаунсфилду за разработку метода осевой (рентгеновской) томографии.

Как написал позже ученик Рентгена, академик А.Ф. Иофе: «Рентгеновы лучи впервые пробили брешь во внешней оболочке атома, положили этим начало открытий атомной физики и в ходе исторического развития привели к освобождению атомной энергии».

В XVIII в. в лабораториях использовались при исследованиях спектральные свойства призмы, с помощью которой Ньютон установил, что белый свет можно разложить составляющие его электромагнитные волны(рис. 3.18) .

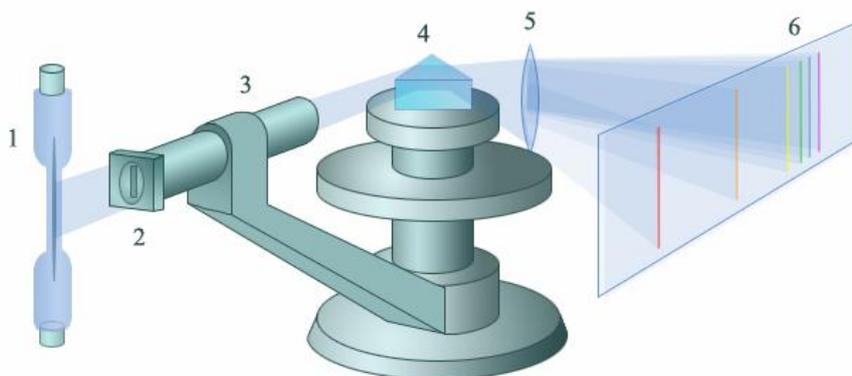


Рис. 3.18. Спектральные свойства стеклянной призмы

Если источник белого света, например, ртутную лампу *1* расположить перед щелью *2* и посредством оптической системы *3* сфокусировать изображение щели на грани стеклянной призмы *4*, то она, преломив белый свет, который можно сфокусировать линзой *5* на экран *6* и увидеть все семь составляющих видимой части спектра электромагнитных волн.

Этим свойством призмы учёные пользовались и для исследования свойств веществ. Спектроскоп, в виду простоты его конструкции был доступен для большого числа исследователей и простых любознательных людей, желающих приобщиться к передовым научным идеям. Спектроскоп в XVIII – XIX в. (рис. 3.19) был чем-то вроде персонального компьютера в наше время.

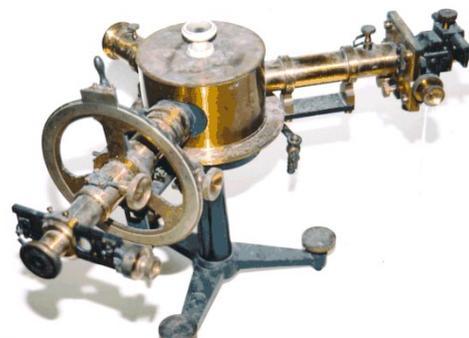


Рис. 3.19. Лабораторный спектроскоп

Ученые, пропуская свет через разреженные газы в которых молекулы не связаны между собой, т.е. их можно считать изолированными, обнаружили, что они испускают линейчатые спектры. Причём спектры различных газов и паров металлов имели строго определённый вид, присущий только этому веществу, что собственно и стало причиной привлечения спектроскопических методов при решении широкого круга физических задач.

Если в откачанную катодную трубку поместить водород и подать на электроды высокую разность потенциалов, то атомы газа начнут излучать несколько электромагнитных волн в узких диапазонах длин, т.е. атомы водорода будут испускать линейчатый спектр, состоящий из отдельных близко расположенных спектральных линий (рис. 3.20).

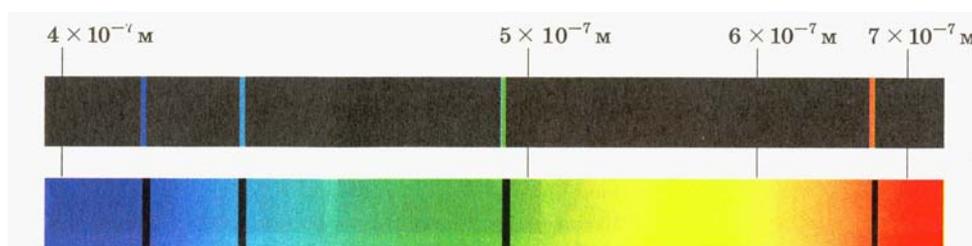


Рис. 3.20. Спектр атома водорода в области видимого света

При исследовании подобных спектров учёные обратили внимание, что линии расположены не беспорядочно, а объединены в серии. Расстояние между линиями убывает по мере уменьшения от более длинных к более коротким.

Занимаясь цифрологией спектральных линий швейцарский учёный Бальмер в 1885 г. для спектральных линий водорода получил формулу для длин волн, располагающихся в видимой части спектра

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4},$$

где λ_0 – константа, n – целые числа, принимающие значения: 3, 4, 5 и т.д. Вместо длины волны в спектроскопии оказалось более удобным применять обратную величину

$$v^* = \frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c},$$

именуемую волновым числом, которое отличается от обычного волнового числа $k = 2\pi/\lambda$ в 2π раз. Формулу Бальмера, таким образом, можно переписать в виде

$$v^* = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots),$$

где $R = 4/\lambda_0$ – постоянная Ридберга

$$R = 109737,309 \pm 0,012 \text{ см}^{-1}.$$

Для дальнейшего рассмотрения структуры атома, однако, рационально отойти от спектроскопической символики и пользоваться для описания линейчатых спектров традиционной циклической частотой, постоянная Ридберга, при этом увеличится в $2\pi c$ раз и станет равной $R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$, тогда уравнение (3.57) представится в виде

$$\omega = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots).$$

Уравнение применительно к атому водорода было распространено на ультрафиолетовую и инфракрасную области циклических частот. Серии линий назвали по фамилиям учёных их обнаруживших:

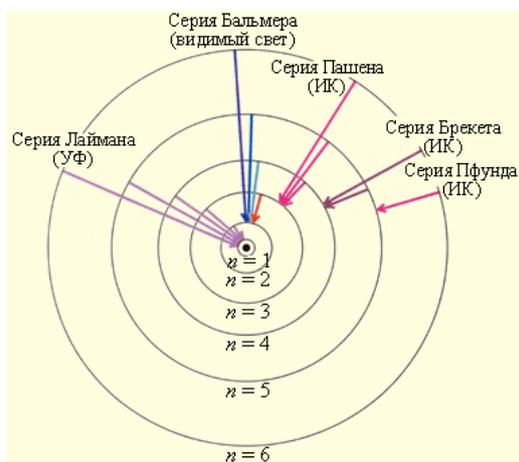


Рис. 3.21. Серии спектральных линий атома водорода

– серия Лаймана

$$\omega = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, 4, \dots);$$

– серия Пашена

$$\omega = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 4, 5, 6, \dots);$$

– серия Брэггетта

$$\omega = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 5, 6, 7, \dots);$$

– серия Пфунда

$$\omega = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 6, 7, 8, \dots).$$

Циклические частоты всех спектральных линий атома водорода можно обобщить в виде формулы

$$\omega = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где m имеет различные значения для отдельных серий: для серии Лаймана $m = 1$; для серии Бальмера $m = 2$ и т.д.

Наблюдаемые экспериментально спектральные линии в спектре атомов требовали теоретического обоснования, нужна была модель атома, которая бы объясняла суть происходящего.

Ближе всех к созданию модели оказался Дж.Дж. Томсон, который более других поднатерел в исследованиях свойств электрона.

В 1903 г. Томсон обнаружил свою модель атома (рис. 3.22), который представлял собой положительно заряженную сферу, в которой симметрично были расположены электроны.

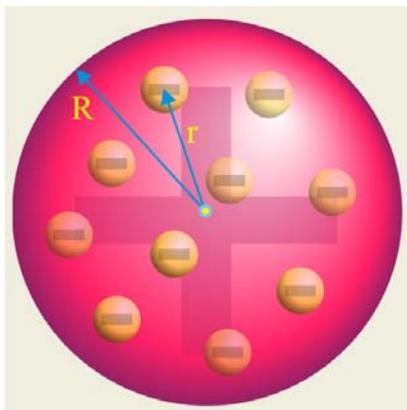


Рис. 3.22. Модель атома Томсона

Спектры испускания Томсон объяснял тем обстоятельством, что электроны, удерживаемые в атоме квазиупругой электростатической силой, могли совершать вблизи положения равновесия гармонические колебания на соответствующих частотах.

Если атом представить виде заряженной сферы, то напряжённость электрического поля внутри определится уравнением (1.38), которое для рассматриваемого случая может быть записано в виде

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r \quad (0 \leq r \leq R),$$

где q – заряд сферы, R – радиус сферы, r – текущий радиус. На электрон, расположенный на удалении r от центра сферы будет действовать сила

$$F = (-q)E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R^3} r = -kr.$$

Будучи выведенным из состояния равновесия электрон станет совершать гармонические колебания на частоте

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_e}} = \sqrt{\frac{e^2}{m_e R^3}},$$

где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, R – радиус атома. Последнее уравнение позволяет определить радиус атома

$$R = \sqrt[3]{\frac{e^2}{m_e \omega^2}}.$$

При длине волны спектральной линии $\lambda \approx 6 \cdot 10^{-7}$ м (0,6 мкм), т.е. в видимой области спектра, что соответствует циклической частоте колебаний $\omega \approx 3 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, расчётный радиус атома определится как

$$R \approx \sqrt[3]{\frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{1 \cdot 10^{-30} (3 \cdot 10^{15})^2}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Полученное значение радиуса по порядку величины совпадает с молекулярно-кинетическими представлениями, что явилось для Томсона подтверждением правомерности разработанной модели. Атом Томсона удовлетворял условию электрической нейтральности атома в обычном состоянии, количество положительного и отрицательного электричества в атомах было одинаковым.

При силовом удалении и присоединении одного или нескольких электронов, атом превращается в положительный или отрицательный ион, который уже становится носителем заряда и может участвовать в процессах возникновения и протекания электрического тока.

Впервые о способностях атомов терять и присоединять электроны сообщал в своих работах Майкл Фарадей, он же ввёл и термин «ион», происходящий от греческого «путешественник».

Судя по мемуарам учеников, прежде всего, Эрнста Резерфорда Томсон сам был не в большом восторге от своей модели, она не могла объяснить вех имеющихся экспериментальных исследований. С целью более полного исследования свойств своей модели, Томсон поручил её экспериментальную проверку своему ученику Эрнсту Резерфорду.



Рис. 3.23. Эрнст Резерфорд

Резерфорд приехал в Манчестер в 1907 г. ставя перед собой цель заняться в Англии исследованием недавно открытой радиоактивности. Появление Резерфорда в Англии инициирует возникновение новой исследовательской группы в составе выдающихся в будущем молодых исследователей Ганса Гейгера, Генри Мозли, Джеймса Чедвика, Нильса Бора и других, руководил ими, естественно, Дж. Дж. Томсон.

Резерфорд занялся исследованием положительно заряженных частиц, выбрасываемых радиоактивными веществами, α – частицами.

В начале 1908 г. Резерфорд установил, что эти частицы представляют атомы гелия, лишённые двух своих электронов, т.е. заряд этих частиц был равным $+2e$. Резерфорд решил использовать α – частицы для выяснения структурных особенностей атома и соответствия их модели своего учителя. Резерфорд установил, что каждая α – частица, попадая на экран, покрытый сернистым цинком, вызывала световую вспышку (сцинтилляцию), которую можно заметить в темноте после адаптации зрения.

На рис. 3.24 (фрагмент 1) показана условная схема экспериментальной установки Резерфорда. Коллиматор из свинца (контейнер толстыми стенками), был снабжён отверстием малых размеров, что позволяло получать узкий пучок α – частиц, который направлялся на листок золотой фольги, который должен был рассеивать частицы. Окрестности фольги были окружены экраном, покрытым сернистым цинком. Наблюдения за вспышками производились с помощью микроскопа.

На рис. 3.24 (фрагмент 1) показана условная схема экспериментальной установки Резерфорда. Коллиматор из свинца (контейнер толстыми стенками), был снабжён отверстием малых размеров, что позволяло получать узкий пучок α – частиц, который направлялся на листок золотой фольги, который должен был рассеивать частицы. Окрестности фольги были окружены экраном, покрытым сернистым цинком. Наблюдения за вспышками производились с помощью микроскопа.

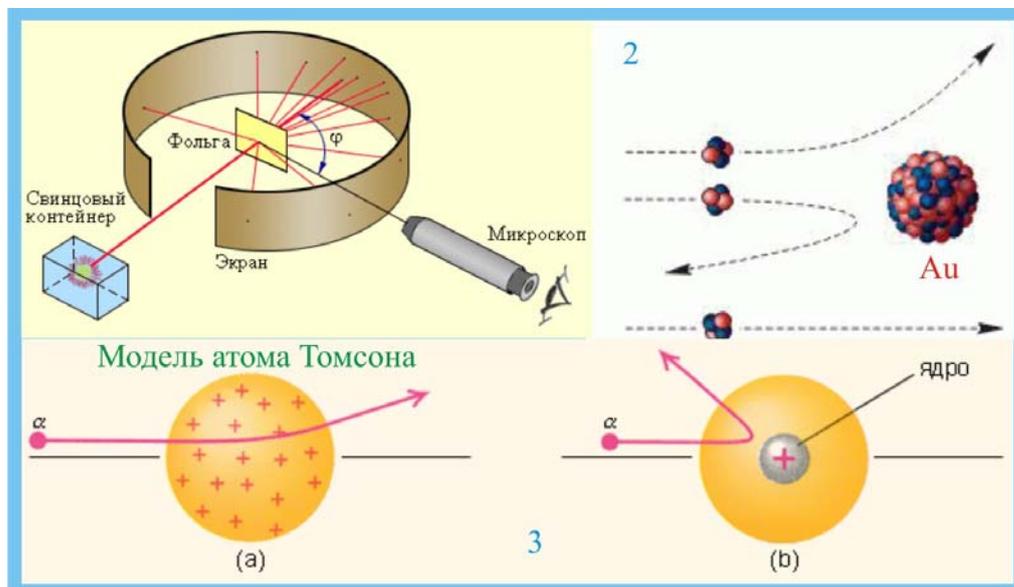


Рис. 3.24. Эксперименты Резерфорда с α – частицами

В качестве рассеивающего вещества золото было выбрано не из-за цвета и престижности. Дело в том, что золото один из самых пластичных металлов с высокой плотностью, который можно прокатать таким образом, что в толщине фольги будет уместиться всего несколько атомных слоёв.

Первоначально в установке Резерфорда экран имел прямоугольную форму и был совмещён с микроскопом. Источник α – частиц, золотая фольга, экран и микроскоп располагались в камере, из которой откачивали воздух (рис. 3.25). Микроскоп с экраном совместно с корпусом камеры могли вращаться вокруг фольги, которая постоянно обстреливалась α – частицами. Таким образом Резерфорд мог с 360 градусным обзором наблюдать рассеяние α – частиц.

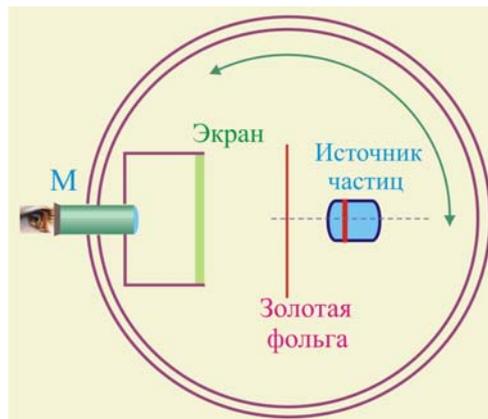


Рис. 3.25. Схема установки Резерфорда

Если бы атом золота был таким как его представлял Томсон (фрагмент *a* рис. 3.24), то α – частицы должны были отклоняться на достаточно малые углы. Вращая детектор из сернистого цинка, исследователи могли измерять относительное число α – частиц, рассеянных под различными углами θ

Согласно модели атома Томсона, α – частицы должны были свободно проходить сквозь атомы золота, и только некоторые из них должны были слегка отклоняться кулоновскими силами.

Следовало ожидать, что поток α - частиц пройдя фольгу, слегка расплывется, и средние углы рассеяния будут составлять несколько градусов. Такое рассеяние действительно наблюдалось, но совершенно неожиданно, вне всяких тогдашних представлений, одна из **20 000** частиц, падающих на фольгу толщиной $4 \cdot 10^{-7}$ м, возвращалась назад, в сторону источника.

Резерфорд по этому поводу писал: « Это было самое невероятное событие, с которым мне когда- либо приходилось сталкиваться. Это было так же невероятно, как если бы вы выстрелили 15 дюймовым (38 см) снарядом в лист папиросной бумаги, а снаряд бы вернулся назад и попал в вас».

Резерфорду потребовалось несколько лет (до 1911 г.), чтобы окончательно разобраться с этим явлением. Он пришёл к выводу, что атом не однороден и имеет нечто очень малое массивное и с положительным зарядом, сосредоточенное в центре. Таким образом, была предложена ядерная модель атома.

Резерфорд наблюдал, что α – частицы способные проникать через тонкие листочки металлов, при этом они отклоняются от первоначального направления своего движения. Было естественно допустить, что эти отклонения вызваны отталкиванием положительно заряженных α – частиц от положительных зарядов атома. Силы, действующие на α – частицы со стороны электронов, не могут заметно изменить направления их движения из-за слишком малой массы электронов.

Можно показать, что результат рассеяния существенно зависит от размеров объема, в пределах которого распределен положительный заряд атома. Только при малом размере положительного заряда атома силы отталкивания могут оказаться настолько большими, чтобы вызвать отклонение траекторий α – частиц на значительные углы.

Если же положительный заряд атома распределен в пределах значительного объема, как полагал Томсон, то каждое прохождение α – частицы вблизи атома отклонит ее на небольшой угол. Рассеяние α – частиц в этом случае будет незначительным.

Действительно, длительные наблюдения Резерфорда и ассистентов показали, что в большинстве своём α – частицы к удовольствию Томсона рассеиваются на достаточно малые углы, порядка $1 - 3^\circ$.

Статистика распределения по углам отклонения хорошо описывалась кривой Гаусса. Но, весьма редко, но всё же не случайно, α – частицы отклонялись на углы, превышающие 145° , причём золото было не аномальным веществом.

Фольга из платины демонстрировала те же тенденции, примерно каждая из 8000 частиц, отклонялась на углы более 90° .

Исследователем стало ясно, что случаи «нестандартного» рассеяния требуют пересмотра модели атома. Получалось (фрагмент 2 рис. 1.24), что летящая α – частица время от времени встречала на своём пути нечто, локализованное в малом объёме и имеющее непременно положительный заряд.

Такая ситуация складывается при соударении одинаковых по размеру и шаров,

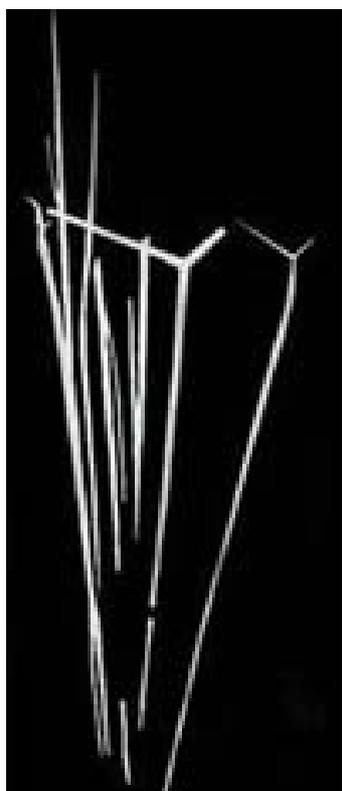


Рис. 3.26. Треки α – частиц

когда массивный шар из свинца, например, покоится, а на него налетает лёгкий пластмассовый шарик.

При центральном ударе свинцовый шар имеет незначительное перемещение, а лёгкий шарик отбрасывается в сторону противоположную первоначальному направлению. Редкость таких событий могла объясняться, что попадать в это «нечто» сложно, ввиду его малости в сравнении с размерами всего атома.

На рис. 3.26 показаны треки, оставленные рассеянными частицами. Ветвление траектории в конце полёта соответствует попаданию в область атомного ядра. Резерфорд до описываемых экспериментов уже получал α – частицы не из радиоактивных веществ, а двойной ионизацией атомов гелия. Он знал, что α – частицы – это атом гелия (положительный ион) лишённый электронов. А кулоновское взаимодействие описывается известным уравнением

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

где r – расстояние между взаимодействующими зарядами. Из этого уравнения следует, что при уменьшении расстояния между взаимодействующими частицами сила Кулона увеличивается, при $r \rightarrow 0$; $F_k \rightarrow \infty$.

На основании экспериментов и проведенного анализа результатов Резерфорд пришёл к заключению, что в центре атома расположена массивная материальная частица с положительным зарядом, которую он назвал – ядро атома.

Прижилось, надо сказать, название. Далее Резерфорд начал решать, так называемую задачу Кеплера о взаимодействии планеты с Солнцем. В кеплеровском случае тоже действуют центральные силы изменяющиеся обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими телами.

Пусть α – частица на большом от ядра расстоянии движется со скоростью v , направленной вдоль прямой (рис.3.27).

Обозначим через u наименьшее расстояние между направлением вектора скорости α – частиц и центром атома O , в котором расположен его положительный заряд Ze . Величина u называется прицельным расстоянием.

При наличии центральных электростатических сил взаимодействия между α – частицей и зарядом Ze , которые являются консервативными, α – частица движется по гиперболе. Вблизи положительно заряженного ядра на α т – частицу действует сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}.$$

Естественно в этой связи предположить, что чем меньше прицельное расстояние y , тем на больший угол отклоняется α – частица. Изменение импульса α – частицы будет равно

$$|\Delta\vec{p}| = 2m_\alpha \sin \vartheta/2.$$

Угол отклонения α – частицы ϑ , который одновременно является углом между асимптотами гиперболы. Определяется соотношением

$$\vartheta = 2\arctg\left(\frac{m_\alpha v^2}{2e \cdot Ze} \cdot y\right).$$

где m_α – масса α – частицы. Масса α – частицы, по современным представлениям, $m_\alpha \cong 6,5 \cdot 10^{-27}$ кг, а масса ядра золота $M(\text{Au}) \cong 3,25 \cdot 10^{-25}$ кг. Другими словами ($M_{\text{Au}} \gg m_\alpha$), т.е. массу ядра можно считать существенно большей по сравнению с пролетающими α – частицами. Из формулы видно, что угол отклонения тем больше, чем меньше прицельное расстояние y . При малых прицельных расстояниях угол отклонения может принимать значения $\theta > \pi/2$, т.е. α – частица может оказаться в результате столкновения с атомом отброшенной назад.

Предположив, что кулоновская сила отталкивания между α -частицей и атомным ядром изменяется по закону $1/r^2$ даже в области чрезвычайно малых внутриатомных расстояний порядка 10^{-15} м, Резерфорд вывел выражение для α – частиц, рассеянных при столкновениях с ядрами. Он показал, что вероятность рассеяния на угол ϑ обратно пропорциональна четвертой степени синуса угла рассеяния, т.е.

$$W \sim \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)}.$$

Кривая зависимости относительного числа частиц $\xi = N_\vartheta/N_\theta$ от угла рассеяния приведена на рис. 3.28. Вероятность рассеяния на углы, превышающие 90° чрезвычайно мала по сравнению с рассеянием на малые углы. Так, частота рассеяния на угол $\vartheta = 120^\circ$ относится к частоте рассеяния на угол $6 - 5^\circ$ приблизительно как $1/10^5$.

Полученные экспериментальные данные и проделанные вычисления послужили основанием для разработки планетарной модели атома (рис.3.29).

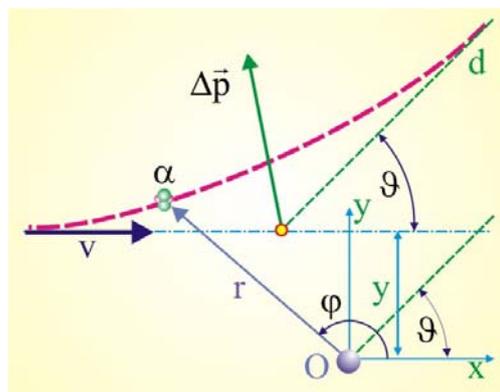


Рис.3.27. Рассеяние α – частиц

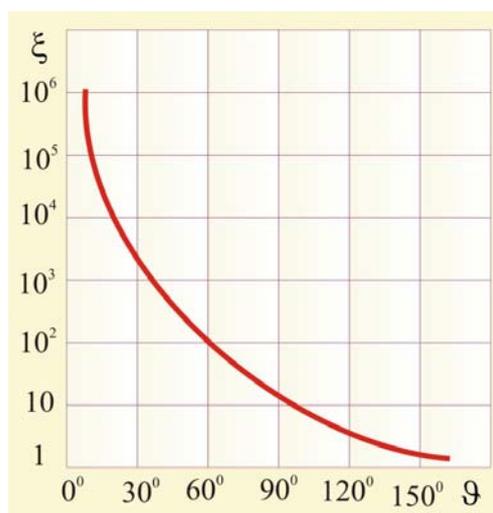


Рис. 3.28. Зависимость относительного числа α – частиц от угла рассеяния]

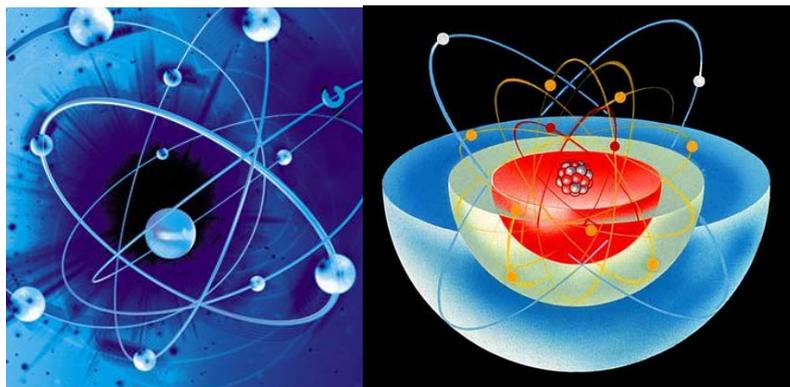


Рис. 3.29. Планетарная модель атома Эрнста Резерфорда

Наименьшее расстояние y_0 , на которое может приблизиться α – частица с ядром золота ($Z = 79$), возможно найти сравнивая кинетическую и потенциальную энергию взаимодействующих объектов. Связывая систему отсчёта с центром масс системы ядро - частица, и пренебрегая кинетической энергией ядра атома золота, можно записать

$$\frac{mv^2}{2} \approx \frac{Ze \cdot 2e}{4\pi\epsilon_0 y_0};$$

Круговые орбиты электронов по классическим представлениям не должны были быть стационарными вследствие излучения электромагнитных волн, атомы же, как известно, образования чрезвычайно устойчивые. Это противоречие удалось объяснить только после более тщательных исследований, в частности, при анализе спектров изучения атомов.

Кстати, когда Резерфорд, соблюдая субординацию, рассказал о результатах экспериментов, то мэтр совсем не расстроился по поводу несостоятельности своей модели атома, похоже, что великий Томсон поставил перед Резерфордом задачу таким образом, чтобы подтвердить заранее известный ему одному ответ.

Когда стало очевидным, что во взаимодействии α – частиц и ядер превалируют кулоновские силы, имеющие сходные с гравитационными силами, удерживающими планеты вокруг Солнца, то аналогия с планетной системой не преминула возникнуть.

Резерфорд свою модель атома так и назвал – **планетарная модель атома** в которой отрицательно заряженные электроны, подобно планетам солнечной системы вращаются вокруг ядра, несущего положительный заряд в точности равный модулю суммарного электрического заряда всех электронов, мечущихся по своим орбитам.

Вместе с тем, несмотря на очевидные достоинства планетарной модели атома, она не раскрывала одно существенное обстоятельство. В соответствии с законами классической электродинамики, всякая ускоренно движущаяся заряженная частица должна излучать электромагнитные волны, т.е. **в процессе движения должна терять энергию, т.е. уменьшать радиус своей круговой орбиты.**

Если это так, то электроны должны были, в конце концов, упасть на ядро. А поскольку атомы демонстрировали устойчивость, то модель Резерфорда этот нюанс не объясняла. Другими словами классические представления не могли объяснить устойчивость атомов.

3.2. Открытие радиоактивности

В январе 1896 г. в Парижской академии наук должно было пройти не совсем обычное заседание. На собрании ведущих учёных Франции знаменитый Пуанкаре (тот самый, у которого Эйнштейн позаимствовал его знаменитые преобразования и забыл по рассеянности сослаться, как это принято в академических кругах) должен прочитать послание из Германии от Конрада Рентгена об открытии им X – лучей.

По слухам, бродившим в академии, Рентген к письменному сообщению приложил не совсем обычные фотографии, полученные при использовании, открытых им лучей.

Среди прочего почтенного учёного люда на заседании присутствовал профессор химии Анри Беккерель. После прочтения письма Рентгена началось его обсуждение, в котором участвовал и Беккерель.

Его более всего интересовал вопрос о месте и причинах возникновения зеленовато-жёлтого свечения трубки. Именно от этого светящегося участка расходились во все стороны, открытые Рентгеном лучи.

Получалось, что некоторая область стекла испускает электромагнитные волны в широком диапазоне длин волн, от видимого света до рентгеновского. Интерес Беккереля к этому свечению был совершенно не праздным. Беккерель занимался исследованием флуоресцирующих веществ.

Ему пришла в голову идея, о том, что причиной возникновения X – лучей могло стать «фосфоресцирующее» свечение стекла трубки. Мысленно Беккерель связывал испускание X – лучей с флуоресценцией некоторых веществ в естественном своём состоянии при их освещении солнечным светом.

Флуоресцирующие вещества, которыми теперь покрывают циферблаты, действительно будучи вынесенными на солнечный свет, при внесении затем в тёмную комнату продолжают потом светиться.

Так себя ведёт флюорит (плавиковый шпат). Флюорит в отсутствие солнечных лучей никак не демонстрирует своей принадлежности к «самоцветам». Другое дело под солнечными лучами, флюорит начинает светиться изнутри голубым светом.

Так же в голубой области спектра испускает серноокислый хинин, а раствор хинина светится красным цветом, даже керосин, выставленный на солнце, слабо светится в синих тонах. Именно этими веществами занимался Беккерель, поэтому письмо Рентгена навеяло ему вполне определённый ход мыслей. Препятствий к проверке своей догадки у профессора не было никаких. Возвращаясь с заседания, Беккерель уже придумал первый эксперимент.

Необходимо взять один из флуорисцентов, положить его на завернутую в чёрную бумагу фотопластинку, вынести на солнечный свет и посмотреть, что из этого получится. Если рентгеновские лучи, как думал Беккерель, возникают при флуоресценции, то фотопластинка должна засветиться, если же испускания в рентгеновском диапазоне нет, то фотопластинка окажется не засвеченной.

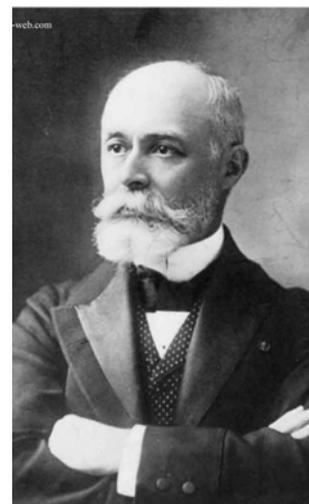


Рис. 3.30. Анри Беккерель

Простенько и со вкусом. У Беккереля под рукой была большая коллекция флуоресцирующих материалов, из которых он выбрал двойную серноокислую соль урана и калия. Таких «лепёшек» у профессора было несколько. Все они на солнце испускали зеленоватое свечение.

Выставив фотопластинку с урановой солью на солнце, Беккерель сделал выдержку, а затем пластинку проявил. Четкое засвеченное пятно на фотопластинке свидетельствовало о правильности предположения: флуоресцирующие вещества испускают рентгеновские лучи, для которых чёрная бумага не является препятствием к проникновению.

Беккерель удержался от публикации своих наблюдений, хотя распырало. Он решил ещё поэкспериментировать с разными веществами, но тут, к сожалению, а вернее к счастью, наступили пасмурные дни. Спряталось Солнце за тучи. Беккерель попрятал принадлежности в ящик своего рабочего стола и занялся другими делами.

Наводя порядок в ящике, он среди прочих вещей обнаружил в заводской упаковке фотопластинку, которую по только ему известным причинам решил проявить. И каково же было удивление Беккереля, когда на стекле обнаружилось тёмное пятно (это в негативе) по форме удивительным образом напоминающее силуэт лежащего в ящике образца урановой соли.

Кроме того на фотоэмульсии образовался силуэт крестика. Это знаменательное, во всех отношениях, событие произошло 1 марта 1896 г. Далее Беккерель вспомнил, что этот «бутерброд» из фотопластинки, «лепёшки» с металлическим крестиком между ними он пытался выносить на солнечный свет, который внезапно исчез.

Теперь же на фоне резкого, какого он не получал ранее на солнечном свете тёмного силуэта «лепёшки» отчётливо проступало светлое изображение крестика. Лучи испускаемые используемой урановой солью легко проходили через чёрную бумагу, но не проникали через металлы, в частности через медный крестик.

Последние наблюдения Беккереля показывали, что двойная серноокислая соль урана и калия испускает проникающие сквозь чёрную бумагу невидимые лучи без флуоресценции, в полной темноте. Это было в высшей степени удивительным и не совпадающим с первоначальными предположениями профессора.

Беккерель понял, что он открыл совершенно новое явление, о котором никто кроме него не догадывался. Дело в том, что многие химики в разных странах работали с солями урана, но никто никогда об обнаруженных свойствах даже не намекал. Далее Беккерель провёл испытания всех доступных ему флуоресцентных соединений, выяснил, что удивительные лучи, способны испускать только химические соединения, содержащие уран.

Потом Беккерель раздобыл некоторое количество этого металла, который ни при каких обстоятельствах не флуоресцировал и повторил эксперименты с фотопластинками. Металл засвечивал эмульсию в абсолютно тёмном пространстве.

Сработал его величество случай, если бы Беккерель для своих первых опытов взял любой другой флуоресцирующий материал, то эффект был бы нулевым. Свечение на солнце имело бы место, а таинственное излучение отсутствовало бы. Сосредоточившись на уране и его соединениях, Беккерель установил, что испускаемые лучи действуют на тела несущие электрический заряд. Заряженные электрометры (рис. 3.31) обычно достаточно медленно, в течение нескольких часов, теряют заряд.

Беккерель располагал урансодержащие вещества вблизи заряженных электрометров, обнаружив, что время разрядки значительно сокращается. Другими словами, лучи, испускаемые ураном, делают окружающий воздух проводящим, т.е. **под действием обнаруженного излучения воздух частично ионизируется.**

Электрически нейтральные в обычном состоянии молекулы превращаются в ионы, которые способствуют ускорению процесса стекания электрических зарядов.

Беккерель после опытов с электрическим зарядом решил опубликовать результаты своих наблюдений. Работа Анри Беккереля среди учёных произвела не меньшее впечатление, чем недавние Откровения Конрада Рентгена об X – лучах.

Многие лаборатории мира срочно начали повторять опыты Беккереля, оставив все прочие свои занятия. В научной среде начался бум, учёный люд почувствовал на уровне интуиции, что явление, открытое профессором Беккереля, кроме чисто фундаментального интереса, сулит невероятные энергетические потенциалы.

В частности, с работой Беккереля познакомилась малоизвестная в научных кругах молодая полька, жившая в Париже, Мария Складовская-Кюри, которая решила проверить, только ли уран и его соединения обладают такой уникальной способностью испускать таинственные лучи.

Юный физик не стала заморачиваться с фотопластинками, а использовала электрометры, в этом случае время экспериментов многократно сокращалось. Мария Складовская-Кюри за достаточно короткое время провела эксперименты с большим количеством веществ в жидком, твёрдом и газообразном состоянии, включая горные породы и минералы.

Из всего многообразия, свойством подобным соединениям урана обладал достаточно редкий металл торий, совсем недавно открытый шведским химиком Берцелиусом.

Торий демонстрировал те же тенденции, что и уран. Чем больше тория содержалось в веществе, тем интенсивнее были испускаемые лучи. Мария Складовская-Кюри придумала для явления название – радиоактивность, от греческого «радиус» – луч. Радиоактивность, по её представлениям следовало понимать, как способность испускать лучи.

В ходе экспериментов Складовской-Кюри был обнаружен достаточно странный феномен. Исследуя руду, добытую вблизи чешского городка Иохимсталль, Мария обратила внимание, что она испускает более интенсивные лучи, чем чистый уран, хотя концентрация чистого металла в ней не высока. Это было странным, когда чистый металл обладал меньшей способностью к лучеиспусканию, чем руда, из которой он, собственно, добывается. Во всех предыдущих опытах интенсивность излучения определялась только концентрацией в мате-



Рис. 3.31. Электрометры



Рис. 3.32. Мария Складовская-Кюри



P. Curie

Рис. 3.33. Пьер Кюри

радиоактивного вещества в руде была настолько мала, что попросту на него не обратили внимания.

На радиоактивность руду никто не проверял, по причине неизвестности этого явления как такового, поэтому и не заметили. Но если вещества в руде было мало и оно так сильно «фонило», то вывод о его более чем у урана радиоактивности напрашивался сам собою.

Само собой возникло желание попытаться извлечь из руды это вещество, выделить, так сказать, в более концентрированном виде, о чистом материале мечтать не приходилось. Дело в том, что урановая руда в те времена была дорогой, а военные ещё всеми радиоактивными делами не заинтересовались, поэтому учёные сосредоточили своё внимание на отходах от уранового производства.



Рис. 3.34. Пьер и Мария Кюри в лаборатории

из которых по химическим свойствам смахивало на висмут, а второе – на барий.

В 1898 г. супругам удалось выделить радиоактивный элемент похожий на висмут, который назвали **полонием**, в честь Родины Марии Складовской, Польши.

Полоний испускал лучи более интенсивные чем чистый уран. И это был не чистый препарат, он находился с меси с остатками рудного производства, в основном с висмутом. Получение в более чистом виде второго вещества, похожего на барий,

риале урана. О своих наблюдениях Мария рассказала своему мужу, известному французскому физику Пьеру Кюри, которого этот феномен заинтересовал и далее, они начали работать вместе. Пьер, как и многие его коллеги, приостановил свои обычные научные увлечения и всецело сосредоточился на явлении радиоактивности.

Возникло предположение, что в иоакимстальской руде содержится некое вещество, обладающее ещё большей радиоактивностью, чем чистый уран. Это было тоже достаточно странным.

С рудой работали многие химики при разработке технологии добычи урана и никакого постороннего вещества не обнаружили. Вывод был очевидным, концентрация этого неизвестного

Супругам удалось найти спонсора их работ в лице Ротшильда, который согласился выделить несколько тысяч франков для забав физиков в новой лаборатории, а правительство Чехии пообещало от щедрот своих презентовать Кюри два вагона с отходами уранового производства.

Вновь созданная лаборатория разместилась в просторном сарае никак не предназначенном для физико-химических исследований, но, тем не менее, процесс пошел.

В отходах после сложных преобразований обнаружилось сразу два радиоактивных вещества, одно

стало очередной целью учёных. Нудно было найти способ отделить барий от полония. В конце 1898 г. супруги Кюри отправили в Парижскую академию письмо с сообщением об открытии нового радиоактивного элемента с интенсивностью испускания лучей в 900 превышающей излучение такого же количества чистого урана.

Перед учёными встала новая задача, получить новое радиоактивное вещество в более концентрированном виде. Новое вещество назвали **радием**, т.е. лучистым веществом. Через три года напряжённой работы в 1902 г. супругам Кюри удалось получить несколько дециграммов хлористого радия, состоящего из 0,76 г. собственно радия и 0,24 г. хлора.

Небольшие белые кристаллики в пробирке обладали почти в миллион раз более интенсивной радиоактивностью, чем такое же количество чистого урана. Мария Складовская-Кюри уже после несчастного случая с мужем, повлекшим его смерть (попал под колёса телеги), получила частый радий, оказавшийся блестящим металлом белого цвета, похожим по внешнему виду на барий или кальций.

Учёными было обнаружено, что стекло, покрытое платиноцианистым барием, начинает светиться в темноте. Это свойство радиоактивных веществ было использовано на практике.

Так, например, сернистый цинк с незначительной примесью радиоактивных веществ обладал способностью накапливать световую энергию и затем, отдавать её в темноте.

В период Первой Мировой войны таким составом покрывали стрелки часов и часовые отметки (рис. 3.36), что делало удобным отсчет времени в темноте. Светящимся составом покрывали прицелы винтовок и стрелки с надписями в артиллерийских буссолях. Спрос на радиоактивные вещества возрос и они многократно подорожали, возникли лаборатории по полупромышленному производству радиоактивных веществ.

В опытах с радием было замечено, что этот материал всегда имел температуру несколько более высокую, чем окружающая среда. Это противоречило здравому смыслу и законам термодинамики, но это был экспериментальный факт.

Пьер Кюри поместил некоторое количество препарата радия в калориметр с таящим льдом и обнаружил, что каждый грамм радия в течение часа выделяет 140 калорий тепла, что эквивалентно $Q \approx 586,2$ Дж.

Напомним, что калория рассматривается в данном случае как энергия, необходимая для увеличения на один градус Цельсия одного грамма воды. Это, конечно, не ахти какое количество тепла, берёзовое полено выделяет при сгорании в несколько десятков раз большее тепло.



Рис. 3.35. Радий



Рис. 3.36. Циферблат часов

Но! Древесина сгорая за короткое время, превращается в золу, продукт бесполезный для дальнейшего получения тепловой энергии. А препараты радия в небольших количествах выделяли тепло, судя по всему, длительное время. Это было очередной сенсацией.

Было открыто свойство радия, неопределённо длительное время находится не в тепловом равновесии со средой. Проведенные Кюри измерения показывали, сто радий представлялся неким «PERPETUUM MODILE», нарушающим сразу два начала термодинамики, а заодно и закон сохранения энергии.

Встал вполне законный вопрос: «Как долго радий будет обладать свойством, нарушать закон сохранения, излучая в пространство энергию неизвестного происхождения?»

В апреле 1901 г. Анри Беккерель вознамерился прочесть своим студентам лекцию о радиоактивности с демонстрацией опытов. Чтобы такие опыты организовать Беккерель одолжил на время к Пьера Кюри малюсенькую пробирку с препаратом радия, менее 1 г. (рис. 3.35).

Пробирку аккуратно завернули в бумагу, затем поместили в картонную коробку, которую «отец радиоактивности» поместил в нагрудный карман своего пальто. После шестичасового хождения по своим делам, Беккерель попал в свою лабораторию и обнаружил, что при приближении к экрану из сернистого цинка, тот начинал светиться.

Экран светился даже тогда, когда профессор поворачивался к нему спиной. Вышло, что излучение проходило через грудную клетку и вызывало свечение. Через 10 дней после этого события Беккерель у себя на груди, напротив того места, где у него помещалась коробка с препаратом, обнаружил небольшое красное пятно. Поначалу пятно не беспокоило профессора, но спустя некоторое время пятно приняло форму стеклянной пробирки, и появилась жгучая боль.

Беккерель обратился к врачу, потому что кожа в том месте полопалась, превратившись в рану, сильно смахивающую на термический ожёг. Врач начал лечить травму Беккереля, как обычный ожёг, и вскоре покраснение исчезло, образовался белый шрам.

После того как Беккерель рассказал Кюри о своих злоключениях, то решил проверить действие открытого им с женой препарата на себе. Кюри прикрепил капсулу с препаратом к своей руке, и десять часов работал, как нив чём ни бывало. Эффект был такой же как и у Беккереля. Сначала покраснение, потом ожёг, после лечения белый шрам.

Потом Кюри попробовал поносить в кармане крупинку радия пол часа, Через 16 дней на коже образовался волдырь, который затем лопнул, болячка прошла после двух недель лечения. Отчаянные были эти ребята, вследствие любопытства и незнания подвергали своё здоровье очевидной в наше время опасности.

Человеческий организм не электроскоп и не фотоэмульсия на стеклянной пластинке. Кюри мало, что понимал в биологии и медицине, поэтому о своих наблюдениях поведал специалисту по медицине, доктору Данло.

Доктор быстро сообразил, – если радий так сильно действует на кожу, то какое-то воздействие должно наблюдаться и на весь организм. Данло начал экспериментировать сначала, как принято у приличных медиков, вначале на животных, а потом уже на людях. Было установлено, что радиоактивное излучение в малых дозах даёт великолепный результат при лечении многих кожных заболеваний, таких как, экзема, лишай, волчанка и многие другие.

3.3. Классическая электронная теория

Введение. Великие теории, делающие понимание нашего мира универсальным, к концу XIX века привели к разделению физики на два глобальных раздела, которые условно можно назвать как: **физика материи** и физика эфира, или точнее, **физика излучения**.

Материя и излучение в прежние времена казались совершенно не связанными сущностями. Действительно, материя, может существовать, ничего не излучая, а излучение в виде электромагнитных волн может распространяться в среде, где и следы материи обнаружить сложно, например, в космическом вакууме. Но исследования, о которых речь пойдёт далее, привели к новой концепции: всё, что мы наблюдаем и даже само наблюдение являются не материей и не излучением, а совокупностью того и другого.

Задача взаимодействия материи и излучения была самой насущной в конце прошлого века. Было очевидно, что если даже предположить, что эти две категории существуют независимо друг от друга, то всё многообразие физических явлений происходит от их взаимодействия.

В сущности, для решения этой задачи, требовалось установить механизм, по которому материя способна излучать и поглощать энергию. Электромагнитная теория Максвелла установила взаимосвязь между электрическими и магнитными полями с одной стороны, и зарядами и токами с другой стороны. Эти уравнения добротнo трудились при описании макроскопических экспериментов.

С появлением методов и средств спектроскопии, стало ясно, что излучение связано с протеканием процессов на микро уровне: на уровне молекул, атомов, и даже ядер. Уравнения Максвелла оказались непригодны для микро уровня, их необходимо было изменить, исходя из особенностей внутриатомных явлений.

Первым, кто задумался о корректировке электродинамики Максвелла, был великий нидерландский физик Хендрик Антон Лоренц (1853 – 1928 гг.), профессор Лейденского университета. Лоренц выдвинул идею ввести в уравнения Максвелла дискретную структуру электричества. С одной стороны он принимал существование универсального диэлектрического и неподвижного эфира, а с другой стороны полагал, наличие вещества, состоящего из дискретной структуры электричества, т.е. электронов.

Если электрон движется с постоянной скоростью, то он, по Лоренцу, несёт с собой своё поле; а если движение ускоренное, то электрон излучает электромагнитные волны. Потеря энергии электроном в каждый момент времени пропорциональна квадрату его ускорения. Наложение всех микрополей в совокупности и даёт максвелловское поле, наблюдаемое в макро масштабе.

Исходя из таких предпосылок, Лоренц записал пять основных уравнений, из которых вытекали все остальные известные законы электромагнетизма. Электро-

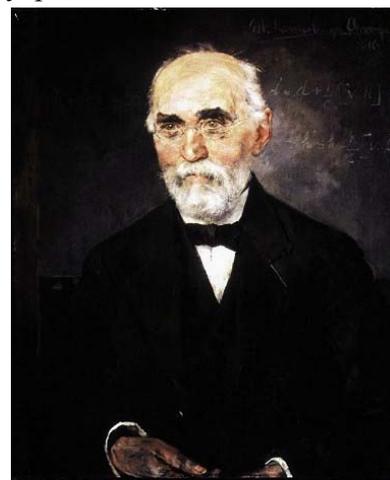


Рис. 3.37. Хендрик Антон Лоренц

динамика Лоренца была принята современниками без особых восторгов, несмотря на то, что явилась вершиной классической теории электромагнетизма.

Уравнения Лоренца были не инвариантны (неизменность с переходом от одной системы отсчёта к другой) при галилеевских преобразованиях, впрочем, как и уравнения Максвелла.

В 1904 году Лоренц обнаружил, что его уравнения инвариантны при других преобразованиях, где время при переходе от системы к системе меняется. Напомним, что Галилей полагал для равномерно движущихся систем отсчёта время неизменным. По предложению Пуанкаре эти преобразования были названы **лоренцевыми преобразованиями**.

Теорию Лоренца вполне можно было привлечь для установления взаимосвязи излучения и материи, но физики конца прошлого века предпочли двигаться в традиционном направлении под знамёнами классической термодинамики.

В конце всё того же XIX века закончились два столетия борьбы корпускулярной и волновой теории света, как казалось, убедительной победой последней.

Правда, имели место два маленьких тёмных пятнышка – **задача о тепловом излучении и обескураживающие результаты опыта Майкельсона**. Казалось, что стоит разобраться с этими мелочами, и физика, в глобальном плане, будет представляться наукой законченной и ясной во всех отношениях.

Но, как это часто случается в жизни, казавшиеся ранее мелочами, перерастают в нечто грандиозное. Вот и в физике, из одной «маленькой» трудности родилась совершенно новая отрасль знаний – квантовая физика.

Механика Галилея – Ньютона прекрасно описывала и предсказывала практически все события, когда материальные объекты двигались со скоростями, существенно меньшими скорости света ($c \cong 3 \cdot 10^8$ м/с). Другими словами, уравнения классической механики прекрасно работали на уровне макромира. В микромире, где массы движущихся объектов были чрезвычайно малы ($m_e \cong 1 \cdot 10^{-30}$ кг) и скорости движения приближались к скорости света, классические представления требовалось корректировать. Один из возможных вариантов коррекции был предложен квантовой механикой.

Следует подчеркнуть, что квантовая механика никак не опровергает основных представлений классической механики, а только уточняет некоторые закономерности движения микроскопических материальных объектов с присущими им высокими скоростями

Вполне резонно, приступая к рассмотрению современных представлений о строении вещества и его взаимодействиях с окружающим пространством остановиться на основных достижениях классической физики и возникших трудностях.

3.4. Элементы квантовой механики

Несмотря на несомненные успехи электронной теории в совокупности с классической электродинамикой и классической механикой к концу XIX в. в физике обозначился ряд проблем, которые в рамках классических представлений не получили внятного объяснения. К таким проблемам следует отнести:

- Удельные теплоёмкости при измерениях оказались ниже значений, предсказываемых молекулярно-кинетической теорией;
- Устойчивость атомов, которые не должны быть устойчивыми по причине непрерывного излучения электромагнитных волн вследствие ускоренного движения электронов по орбитам;
- Законы фотоэффекта не соответствовали представлениям электронной теории;
- Законы излучения абсолютно чёрного тела противоречили волновой классической теории;
- Явление радиоактивности не могло быть объяснено с позиций классической физики.

Излучение телами электромагнитных волн. Всем известно, что тела, нагретые до высоких температур, начинают излучать электромагнитные волны в видимом диапазоне длин волн. При относительно низких температурах некоторые вещества светятся при люминесценции или под влиянием падающих электронов.

При спектральных исследованиях было обнаружено, что излучаемые электромагнитные волны имеют разные амплитуды и длины волн, т.е. излучение имеет вполне определённый спектр. Напомним, что между частотой f , периодом T , скоростью распространения c и длиной волны имеют место соотношения

$$f = \frac{1}{T}; \quad \lambda = cT; \quad c = f\lambda; \quad \omega = 2\pi f,$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Видимый свет имеет длины волн в диапазоне от $\lambda_{\text{кп}} \approx 760$ нм до $\lambda_{\text{фиол}} \approx 380$ нм. На рис. 3.38 приведена шкала электромагнитного излучения для волн обнаруженных к настоящему времени.

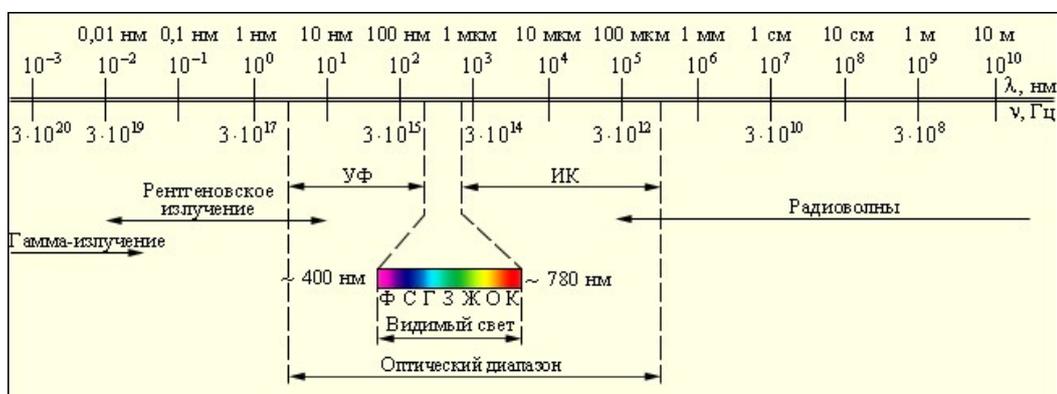


Рис. 3.38. Шкала электромагнитных волн

Как было показано ранее, спектры электромагнитного излучения могут быть сплошными и линейчатыми.

Сплошные спектры, в большинстве своём, излучаются веществами, находящимися в твёрдом или жидком состоянии, при относительно больших температурах. Сплошной спектр имеет место при резком торможении электронов у антикатаода рентгеновских трубок.

Линейчатые спектры испускаются веществами в газообразном или парообразном состоянии, их можно обнаружить при относительно низких температурах.

Электронная классическая теория объясняет возникновение излучения колебаниями электронов под действием различных внешних причин, причём период колебаний представляется в соответствие с этой теорией уравнением

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m_e}{b}},$$

где m_e – масса электрона, b – коэффициент квазиупругой силы. Поскольку массы электронов в классической физике принимаются постоянными $m_e \approx 1 \cdot 10^{-30}$ кг, то разные длины испускаемых волн можно объяснить только различными значениями коэффициента b .

В иных линейчатых спектрах обнаружено до 10^5 отдельных спектральных линий, а в случае сплошных спектров, разговор о некоем наборе значений b теряет всякий смысл. Если бы в конце XIX в. было бы известно строение атомов, то можно было бы в соответствии с особенностями строения атомов скорректировать теорию, но происходило всё наоборот. О строении атомов приходилось судить по спектрам, которые они испускали.



Рис. 3.39. Модель абсолютно-чёрного тела

Первые затруднения классической теории начались при объяснении излучения абсолютно-чёрного тела. На рис. 3.39 приведен внешний вид одного из вариантов такого тела.

Массивная сфера с толстыми теплоизолированными стенками имеет малое отверстие. Если в это отверстие направить луч света, то он многократно отразившись от внутренней поверхности наружу не выйдет.

Если внутрь сферы поместить небольшое раскалённое тело, то его излучение будет происходить только через отверстие. В соответствие с законом Кирхгофа спектр излучения должен совпадать со спектром испускания.

Таким образом, свечение тела, находящегося внутри сферы должно определяться только температурой. В модели приведенной на рис. 3.39 электрическим током нагревается тонкий слой внутренней поверхности, излучение выходит за пределы сферы только через отверстие. Первые опыты по изучению спектра абсолютно-чёрного тела были проведены Луммером и Прингсгеймом, получился довольно обескураживающий результат.

Проведенные спектроскопические исследования позволили установить следующие закономерности излучения:

- **Спектр излучения абсолютно чёрного тела является сплошным, т.е. в спектре представлен непрерывный ряд различных длин волн;**
- **Распределение энергии в спектре излучения зависит от длины волны. С увеличением длины волны спектральная плотность энергии увели-**

чивается, достигает отчетливо выраженного максимума при некоторой длине волны λ_{\max} , а затем уменьшается;

- С повышением температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн.

Принято считать, что теоретические исследования теплового излучения начались работами Кирхгофа в 1859 г. после открытия им закона теплового излучения. Именно Кирхгоф предложил концепцию абсолютно-чёрного тела и описал его модель. Оказалось, что тепловое излучение является наиболее распространённым видом электромагнитных волн.

Тепловое излучение является следствием уменьшения внутренней энергии тела и наблюдается при любой температуре отличной от 0 °К. Следуя закону сохранения энергии, тепловое излучение должно приводить к уменьшению внутренней энергии, т.е. к охлаждению излучающего тела, если к нему не подводится энергия извне.

При поглощении телом электромагнитных волн его внутренняя энергия возрастает, что приводит к увеличению температуры. Постоянное испускание и поглощение электромагнитной энергии приводит к тому, что устанавливается динамическое равновесие между двумя этими процессами.

Излучение удобно характеризовать его **энергией W и потоком излучения Φ_e** , который определяется энергией, излучаемый за единицу времени

$$\Phi_e = \frac{W}{\tau},$$

Чтобы сравнивать излучающие способности тел различной площади вводят понятие **энергетической светимости R_e** , которая определяется как отношение потока излучения к площади излучающей поверхности

$$R_e = \frac{\Phi_e}{S}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Приведенные выше характеристики являются по сути своей интегральными, по ним невозможно судить о спектральном составе излучения. В этой связи, в рассмотрение вводится ещё одна величина – **спектральная плотность энергетической светимости r_λ или r_ω** , которую иногда называют лучеиспускательной способностью. Спектральная плотность представляет собой отношение энергетической светимости dR_e к ширине волнового или частотного диапазона

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_e}{d\lambda}.$$

Энергетическая светимость в таком случае может быть определена интегралом

$$R_e = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Из повседневного опыта известно, что если нагревать твердое тело, то оно вначале краснеет, а с повышением температуры свечение тела становится все более белым. Это свидетельствует о том, что максимум интенсивности теплового излучения по мере повышения температуры тела смещается к фиолетовому концу спектра, т.е. к его коротковолновой части. Длина волны λ_{\max} в спектре излучения абсолютно черного тела, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, определяется **законом смещения Вина:**

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где постоянная Вина $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К.

Австрийский физик И. Стефан, анализировавший полученные экспериментальные данные, и Л. Больцман, исходивший из общих термодинамических соображений, установили зависимость энергетической светимости черного тела от температуры. Согласно **закону Стефана - Больцмана**.

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4,$$

т.е. энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры. Коэффициент пропорциональности σ называется постоянной Стефана – Больцмана $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Введём далее пространственную характеристику излучения – **плотность энергии излучения**, т.е. количество излучённой телом энергии в единице объёма [40]

$$u = \int_0^{\infty} u_{\omega} d\omega = \int_0^{\infty} u_{\lambda} d\lambda,$$

где величины $u_{\omega} d\omega$ и $u_{\lambda} d\lambda$ являются объёмной плотностью энергии, приходящейся на интервал циклических частот от ω до $\omega + d\omega$ или диапазон длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, величины u_{ω} и u_{λ} называются спектральными плотностями лучистой энергии. Если анализу подлежит один и тот же диапазон излучения, то

$$u_{\lambda} d\lambda = u_{\omega} d\omega.$$

Так как

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega},$$

то

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{d\omega}{\omega},$$

знак минус, в данном случае, означает, что с ростом частоты длина волны уменьшается. Считая величины $d\lambda$ и $d\omega$ положительными можно записать следующие соотношения

$$u_{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} u_{\omega}; \quad u_{\omega} = \frac{\lambda}{\omega} u_{\lambda}.$$

Исторически так сложилось, что теоретики имеют обыкновение пользоваться величиной u_{ω} , а экспериментаторы предпочитают – u_{λ} , что, в общем-то, на суть рассматриваемых вопросов влияния не оказывает. Основной задачей теории теплового излучения являлось определение зависимости величины плотности энергии излучения от частоты или длины волны при различных температурах.

Теоретическое определение функции $u_{\omega}(\omega, T)$ в рамках классической волновой теории было выполнено в 1900 г. **лордом Рэлеем**, а затем развито **Джинсом**. Эти знаменитые волновики применили к излучению абсолютно-чёрного тела теорему классической статистической механики о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы. На каждую степень свободы, в соответствие с этой теоремой, приходится в среднем кинетическая энергия

$$\varphi = \frac{1}{2} k_B T,$$

где $k_B \approx 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана. Если рассматриваются колебательные степени свободы, то необходимо учитывать и потенциальную энергию, обусловленную действием квазиупругой силы. На каждую колебательную степень свободы, таким образом, приходится энергия

$$\varphi = k_B T.$$

Таким образом в классическом представлении задача об излучении сводилась к определению функции $u_\lambda(\lambda, T)$ или $u_\omega(\omega, T)$, что было возможным при правильном определении числа степеней свободы колеблющихся электронов.

Формула Рэлея – Джинса, полученная на основании волновых представлений, имела вид

$$u_\lambda = \frac{k_B T}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \lambda^2 d\lambda = \infty.$$

Вид функции u_λ показан на рис. 3.40 пунктирной линией. По теории знаменитых специалистов в волновой механике получалось, что **тепловое равновесие между веществом и излучением невозможно**.

Приравнивание в возможностях всех степеней свободы приводило к тому, что вся энергия излучения абсолютно чёрного тела должна была концентрироваться в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Эренфест это назвал **ультрафиолетовой катастрофой**. Дело в том, что по теории Рэлея – Джинса излучение в полости имеет бесконечное число степеней свободы, а вещество вполне конечное.

Спектроскопические экспериментальные исследования излучения абсолютно чёрного тела выявили совершенно отличные от теоретического вида функции $u(\lambda, T)$, на рис. 3.40 они показаны сплошными цветными линиями, соответствующими различным температурам излучающего тела от $T = 3500$ °К до $T = 5500$ °К. Почувствуйте, как говорится, разницу между правдивым экспериментом и надуманной теорией.

Когда задачу об излучении абсолютно чёрного тела поручили решать юному Макс Планку, желавшему попробовать свои силы в теоретической физике, то он тоже решил применить теорему об энергетической равнозначности степеней свободы.

Но Планк был более математик, чем физик и по первости решил поступить бесхитростно, чисто по студенчески. Он проанализировал поведение простейшего гармонического осциллятора, квазиупруго связанного с ядром электрона, находящегося в полости с равновесным излучением.

При действии хаотически меняющегося электромагнитного поля электрон должен совершать колебания с хаотически меняющимися амплитудами и фазами, излучая и поглощая энергию электромагнитных волн.

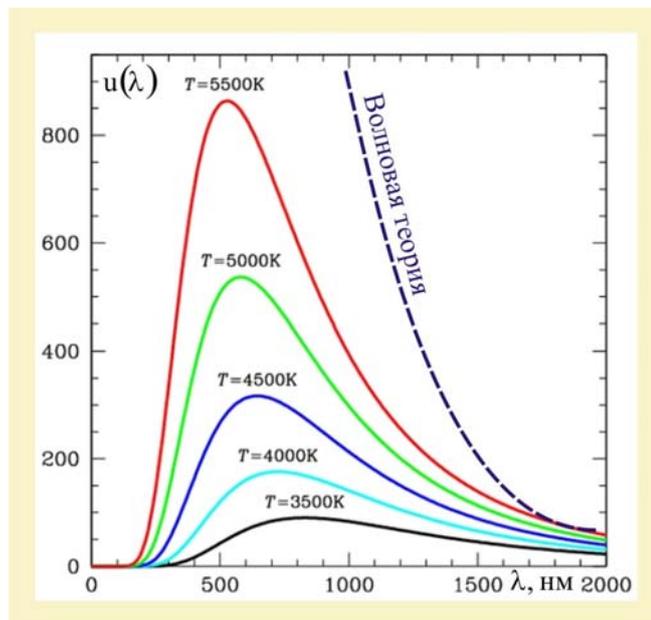


Рис. 3.40. Спектр излучения абсолютно-чёрного тела

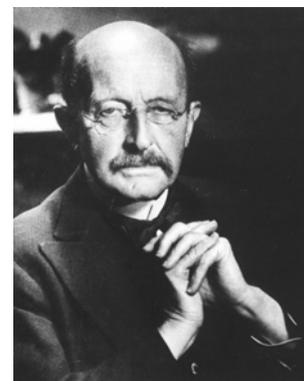


Рис. 3.41. Макс Планк

Энергия такого осциллятора тоже должна совершать беспорядочные флуктуации вокруг среднего значения $\langle \varepsilon \rangle$. У Планка получилось уравнение, идеологически совпадающее с формулой Рэлея – Джинса

$$u_{\omega} = \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\pi^2 c^3} \omega^2.$$

Убедившись в бесперспективности традиционных подходов, Планк, не заботясь о физическом смысле, **начал подгонять формулу излучения под данные эксперимента**. Получились уравнения для классической физики довольно странноватого вида

$$u_{\omega} = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{k_B T} - 1\right)},$$
$$u_{\lambda} = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T} - 1\right)}.$$

Странность этого уравнение заключалась в том, что оно содержало некую постоянную величину $\hbar = h/2\pi \approx 1 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, ($h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с). **Это означало, что обычный гармонический осциллятор мог излучать энергию только порциями.**

Позже Планк нашёл теоретическое обоснование своему уравнению. Он высказал гипотезу о том, что электромагнитная энергия излучается и поглощается не непрерывно, а порциями, названными квантами.

Согласно этой гипотезе энергия гармонического осциллятора могла принимать только фиксированные значения, отличающиеся на величину

$$\varepsilon_f = hf \equiv h\nu.$$

где $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, f, ν – частота. Таким образом, обмен энергией резонирующего электрона происходит порциями $\langle \varepsilon \rangle = h\nu$, т.е. квантовыми скачками. Такое смелое утверждение требовало совершенно по новому объяснить связь между излучаемой энергией и колебаниями осциллятора, в частности электрона на резерфордовской орбите.

Возможны два варианта. Во-первых, можно предположить, что резонатор во время колебаний вообще не излучает энергии, а только в некоторый момент времени генерирует электромагнитную волну частотой ν , в этом случае закон сохранения энергии для излучающих атомных структур не исполняется, во-вторых, можно допустить что существуют определённые уровни энергии (разрешённые уровни) на которых может присутствовать электрон и при перескоках с одного энергетического уровня на другой происходит излучение энергии. Вторая точка зрения оказалась прагматичней и в дальнейшем она нашла теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение.

Квантовую гипотезу Планка к фотоэффекту, открытому в 1872 г. русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым, применил Генрих Герц.

В его экспериментах свет надал на цезиевый металлический катод (рис. 3.43), помещённый в откачанную стеклянную колбу с кварцевым окном. При падении на катод света в цепи начинал протекать ток, законы изменения которого и подлежали исследованию.



Рис. 3.42. А.Г. Столетов

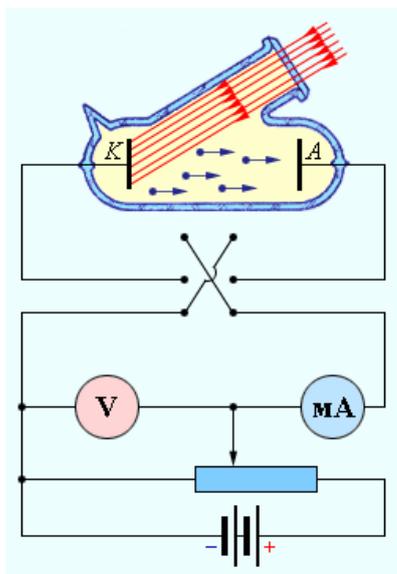


Рис. 3.43. Установка для исследования фотоэффекта

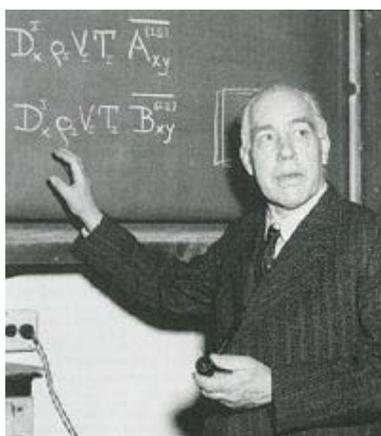


Рис. 3.44. Нильс Бор

Изменение энергии с частотой в этом случае по Бору записывается следующим уравнением

$$h\tilde{\nu} = (n_1 - n_2)h\nu.$$

Трактовка последней формулы с позиций классической волновой теории, когда излучаемая частота совпадает с частотой собственных колебаний осциллятора, приводит к результату

$$n_1 - n_2 = 1,$$

или в противном случае необходимо предположить, что излучаемая частота отличается от собственной частоты рассматриваемой колебательной системы, в этом случае излучение не монохроматично. Для устранения этого противоречия теоретикам квантовых представлений пришлось ввести принцип соответствия, регулирующий частоту переходов между состояниями.

Величину постоянной Планка экспериментально определил Роберт Милликен.

Герц, следом за Столетовым, установил, что **интенсивность света влияет лишь на количество вылетающих электронов, а их скорость, вопреки здравому классическому смыслу, зависит исключительно от частоты падающего света.** Герц справедливо предположил, что кинетическая энергия вылетающего электрона равна

$$W = \frac{m_e v^2}{2} = h\tilde{\nu}.$$

Таким образом, при фотоэффекте изменение энергии атомной системы связано с частотой падающей световой волны соотношением

$$h\tilde{\nu} = W_1 - W_2.$$

Альберт Эйнштейн, ознакомившись с работами Герца, оформил полученные им результаты в виде закона своего имени

$$h\tilde{\nu} = \frac{m_e v^2}{2} + A,$$

где A – работа выхода электрона из металла.

Процессы перехода электрона из одного состояния в другое при излучении и поглощении энергии теоретически проанализировал Нильс Бор. Бор ввёл в рассмотрение, так называемое, условие частот, которое разрешало атому излучать или поглощать энергию только в определённом квантовом состоянии. Применяя условие частот к гармоническому осциллятору можно видеть, что при их переходе из одного энергетического состояния $W_1 = n_1 h\nu$ в состояние, в другое с энергией $W_2 = n_2 h\nu$, можно записать

$$\Delta W = (n_1 - n_2)h\nu.$$

3.5. Квантовая модель атома

Несмотря на то, что модель атома Резерфорда инициировала целый поток идей о строении атома и особенностях устройства электронных составляющих, этой модели были присущи принципиальные недостатки.

Наиболее наглядно это наблюдается на примере самого простого атома водорода, который по представлениям Резерфорда содержит на орбите один единственный электрон, компенсирующий положительный заряд ядра, равный по модулю заряду электрона.

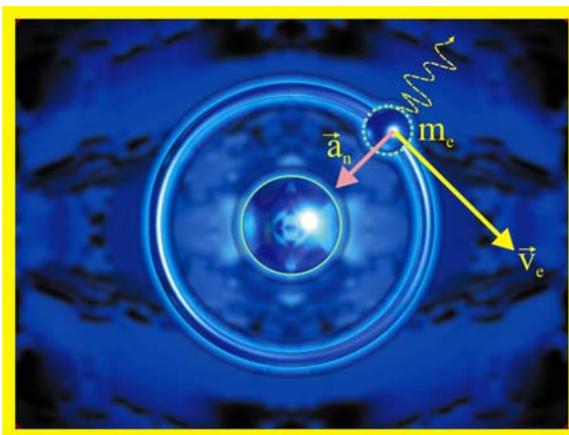


Рис. 3.45. Атом водорода по Резерфорду

Как уже отмечалось ранее, электрон, совершая вращение вокруг ядра по круговой или эллиптической орбите, ввиду специфики криволинейного движения обладает центростремительным ускорением a_n (рис. 3.45). В соответствии с классической электродинамикой такой ускоренно движущийся электрон неминуемо должен излучать электромагнитную волну, следовательно, движение его будет не круговым или эллиптическим, а спиралевидным, т.е. в конце концов, эта спираль должна закончиться на ядре.

Кроме того, модель атома Резерфорда не объясняла, почему атомы излучают только определённые частоты. Когда Резерфорд вершил судьбы мировой науки, поблизости, в статусе ученика обретался молодой датский студент Нильс Бор, которому все эти атомно-ядерные разговоры были чрезвычайно интересны.

Наслушавшись научных диспутов между Дж. Дж. Томсоном, Резерфордом и другими титанами физики и ознакомившись с работами Макса Планка, Нильс Бор заподозрил, что между квантовой гипотезой Планка и устройством атома должна быть взаимосвязь, коль квантовая теория так убедительно работает на чёрном теле и фотоэффекте.

Бор подозревал, что квантовые представления могли объяснить стабильность атомов. Последовательность рассуждений Нильса Бора была примерно такова.

Для начала Бор предположил, что электрон, вопреки классической электродинамике, находясь на стационарной орбите, не излучает. Сила Кулона со стороны ядра

$$\vec{F}_k = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot e}{r^3} \vec{r},$$

удовлетворяет закону обратных квадратов, как и гравитационная сила Ньютона

$$\vec{F}_G = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r},$$

т.е. в классическом варианте задача о движении электрона аналогична задаче о движении планет вокруг Солнца, почему, собственно, Резерфорд и пришёл к пла-

нетарной модели атома. Потенциальная энергия, обусловленная силой Кулона, определяется как

$$\Pi(r) = -\frac{Ze^2}{r},$$

где Ze – заряд ядра, принятый Бором как материальная точка. Нормальное ускорение электрона (рис. 3.48) при линейной скорости движения v равно

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

Условие нахождения электрона на стационарной орбите запишется в виде равенства силы Кулона и силы инерции, так же как при рассмотрении планет, вращающихся вокруг Солнца, с той разницей, что гравитационная сила заменяется силой Кулона

$$\frac{m_e v^2}{r} = k \frac{Ze^2}{r^2}; \Rightarrow m_e v^2 = \frac{Ze^2}{r}.$$

Далее было записано уравнение для суммарной энергии электрона на орбите

$$W = \frac{m_e v^2}{2} + \Pi(r) = -\frac{Ze^2}{2r},$$

уравнение угловой скорости

$$\omega = \frac{v}{r},$$

и кинетического момента, направленного перпендикулярно плоскости движения электрона

$$L = m_e v r.$$

Таким образом, движение электрона описывалось пятью переменными $\{r, v, W, \omega, L\}$, которые связаны четырьмя уравнениями. Если в качестве известной величины взять одну из этих переменных, то остальные можно выразить через неё. Предположим, что известной величиной является кинетический момент L , тогда

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{L^2}{Ze^2 m_e}; \\ v &= \frac{Ze^2}{L}; \\ \omega &= \frac{Z^2 e^4 m_e}{L^3}; \\ W &= -\frac{Z^2 e^4 m_e}{2L^2}. \end{aligned} \right\}$$

Далее **Нильс Бор** предположил, что кинетический момент не может принимать произвольных значений, а подчиняется правилу квантования **Макса Планка**, т.е.

$$L = n\hbar,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$, поскольку с L связаны все остальные переменные, то они тоже становятся квантованными

$$\left. \begin{aligned} r_n &= \frac{n^2}{Z} \left(\frac{\hbar^2}{m_e e^2} \right); & v_n &= \frac{Z}{n} \left(\frac{e^2}{\hbar e} \right) c; \\ \omega_n &= \frac{Z^2}{n^3} \left(\frac{m_e e^4}{\hbar^3} \right); & W_n &= -\frac{Z^2}{n^2} \left(\frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \right). \end{aligned} \right\}$$

Первое уравнение системы позволяет ближайшую к ядру атома орбиту охарактеризовать радиусом, который в системе СИ представится как

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м} \approx 0,53 \text{ \AA} ,$$

и называется **Боровским радиусом**. Энергетический масштаб оценивается **постоянной Ридберга**

$$Ry = \frac{m_e e^4}{4\pi\epsilon_0 \hbar^3} = \frac{e^2}{2a_0} \cong 13,6 \text{ эВ} .$$

В качестве энергии в 1 эВ принимается энергия электрона, прошедшего разность потенциалов в 1 вольт, $1\text{эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Число n в квантовой механике называется **главным квантовым числом**.

Бор постулировал, что поглощение и излучение энергии электроном происходит скачкообразно, только при переходе из одной разрешённой орбиты на другую, причём **скачкообразное перемещение с высокой орбиты W_n на более энергетически низкую орбиту W_{n-1} сопровождается испусканием кванта энергии, т.е. фотона**.

Естественно предположить, что таким же образом электрон меняет орбиту при поглощении кванта энергии. Причём падающий фотон должен иметь такую же величину энергии, чтобы она компенсировала разность энергий между двумя разрешёнными уровнями. Состояние электрона с $n = 1$ принято за основное, в котором не происходит излучения энергии.

Атомы веществ в естественном состоянии находятся в большинстве своём в стационарном состоянии. Чтобы подняться на более высокий энергетический уровень, электрон должен захватить подходящий фотон. Все состояния с $n > 1$ являются нестабильными.

Введя таким образом в ядерную модель атома Резерфорда квантовые представления, Нильс Бор сформулировал два постулата (два основных положения).

- **Электроны могут находиться в атоме только на определённых орбитах, причём, несмотря на ускоренное движение, излучения электромагнитных волн не происходит.** Орбиты, соответствующие стационарным состояниям определяются условием

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi} .$$

Атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое (рис. 3.46)

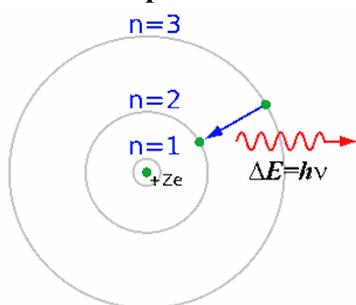


Рис. 3.46. Излучение фотона

$$h\nu = W_n - W_{n-1} .$$

Применив свои постулаты к простейшему атому водорода, Нильс Бор получил следующее условие стационарности орбит

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ee}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n} .$$

Выразим из первого постулата скорость электрона

$$v_n = \frac{nh}{2\pi m_e r_n} ,$$

возведём её в квадрат и подставим в уравнение радиуса орбиты

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Как следует из уравнения радиусы разрешённых электронных орбит пропорциональны n^2 . Если уравнение разрешить для главного квантового числа $n = 1$, то получится Боровский радиус $r_1 \approx 5,28 \cdot 10^{-11}$ м. Если ядро атома считать неподвижным, то электрон на орбите можно описать следующими энергетическими соотношениями, выраженными в системе СИ

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}; \\ \Pi &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}; \\ W &= K + \Pi = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}. \end{aligned} \right\}$$

Минимальной энергией обладает электрон при $n = 1$. Энергия в произвольном разрешённом состоянии определится как

$$W_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}.$$

В отличие от модели атома Резерфорда, постулаты Бора и записанные выше уравнения смогли объяснить линейчатые спектры атомов, в частности атома водорода. Согласно второму постулату Бора излучаемый или поглощаемый квант энергии определяется условием

$$h\nu = W_2 - W_1 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Уравнение можно записать для частоты и длины волны

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \end{aligned}$$

Смножитель последнего уравнения оказался совпадающим в первом приближении со значением постоянной Ридберга, полученной первоначально экспериментальным путём

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 c},$$

что рассматривается, как одно из подтверждений справедливости квантовой модели атома Бора. Бор показал, что для более точного вычисления постоянной Ридберга необходимо внести корректировки в уравнения, связанные с подвижностью ядра.

Теория водородоподобного атома Нильса Бора позволила объяснить его линейчатые спектры, обусловленные переходами электрона из одного стационарного состояния в другое, с меньшей энергией.

Каждая, регистрируемая экспериментально спектральная линия является свидетельством акта испускания фотона определённой длины волны, при переходе электрона на низший энергетический уровень

Сам Нильс Бор лучше других осознавал недостатки своей теории, как промежуточного звена между, планетарной моделью атома и квантовыми представле-

ниями. Необходимость в корректировке теории напрашивалась по многим причинам, основной из которых являлась корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного поля.

То, что свет в зависимости от обстоятельств эксперимента вёл себя то как волна, то как поток частиц, говорило о необходимости привлечения для объяснения это странности кванта действия Макса Планка.

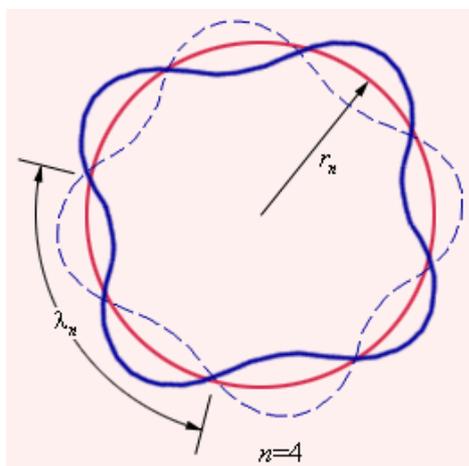


Рис. 3.47. Волны де Бройля

Идея теоретического объединения частиц (корпускул) и волн принадлежала французскому физику Луи де Бройлю, который предположил, что движение электрона или другой частицы с массой покоя отличной от нуля по орбите, можно отождествить с волновым процессом.

Де Бройль провёл аналогию между энергией кванта и импульсом частицы

$$\varepsilon = h\nu \Leftrightarrow p = h/\lambda,$$

откуда длина волны де Бройля для электрона определяется как (рис. 3.47)

$$\lambda = \frac{h}{m_e v}.$$

Согласно гипотезе де Бройля стационарными будут те орбиты электрона, на которых укладывается целое число волн $2\pi r_n = n\lambda$.

Приписав частицам волновые свойства де Бройль объяснил такое необычное для классической физики явление как дифракция и интерференция электронов на узкой щели.

На рис. 3.48 показана качественная картина прохождения пучка электронов через две узкие щели. По классическим представлениям, если бы электроны были частицами, то на экране наблюдались бы два пятна, а реально электроны демонстрировали ярко выраженные волновые свойства.

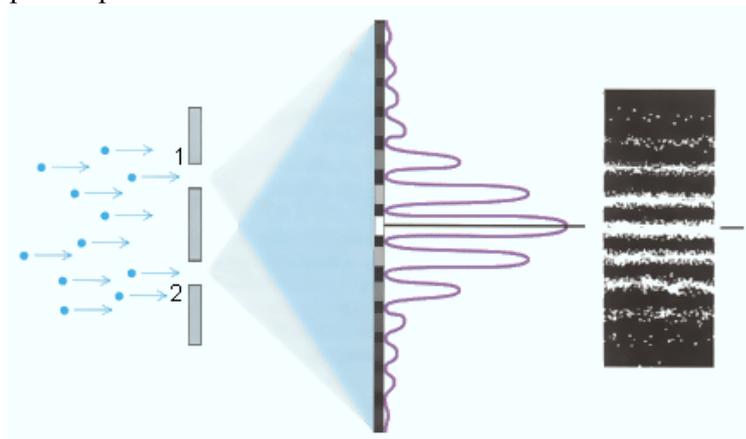


Рис. 3.48. Дифракция электронов на двух щелях

4. Элементы физики атомного ядра

4.1. Структура и свойства атомных ядер

Напомним, что в 1895 г. Ленард, наблюдая поток частиц в разрядной трубке, обнаружил, что заряженные частицы (электрон ещё не был открыт) проходят сквозь металлическую фольгу. Этот факт привел теоретиков и экспериментаторов в необычайное изумление, потому что проникновение «чего-то» через металлическую фольгу по существовавшим на то время представлениям, казалось, мягко говоря, не вполне вероятным.

Вывод напрашивался сам собой. Если это «что-то» которое регистрируют приборы и оно реагирует на электрические и магнитные поля проскальзывает сквозь металл, то, следовательно, металл не такой монолитный для этого самого «чего-то». Когда Дж. Дж. Томсон выяснил с чем имели дело ребята, возбуждавшие поток частиц в вакууме между двумя электродами с высокой разностью потенциалов, то ситуация немножко прояснилась.

Отрицательно заряженные частицы (электроны) вырывались из металлического катода и, будучи разогнанными электрическим полем пролетали сквозь атомы металла, не сталкиваясь с ними. Стало ясно, что либо атомы упакованы так плотно, как казалось, либо сам атом не таков, каким его представлял открыватель электрона Дж. Дж. Томсон.

Получалось, что в межатомном пространстве есть некие пустоты, через которые и просачиваются пронзительные электроны. Но такого тоже не могло быть, потому что если бы ионы металла отстояли друг от друга далеко, то это была бы уже не кристаллическая структура, а жидкость или даже газ.

В твёрдом состоянии между структурными элементами вещества должны быть прочные связи, которые, собственно, обеспечивают все физические свойства присущие твёрдым телам.

В 1911 г. Эрнст Резерфорд проверяя достоверность томсоновской модели атома, кстати, своего учителя, при непосредственном участии Х. Гейгера и Э. Марсдена при анализе условий рассеяния α – частиц, пришёл к выводу о несостоятельности модели шefa, и установил наличие в центре атома массивной положительно заряженной частицы, много меньшей размеров атома, позже названной ядром. Оказалось, что в ядре сосредоточено более 90% всей массы атома (рис.4.1).

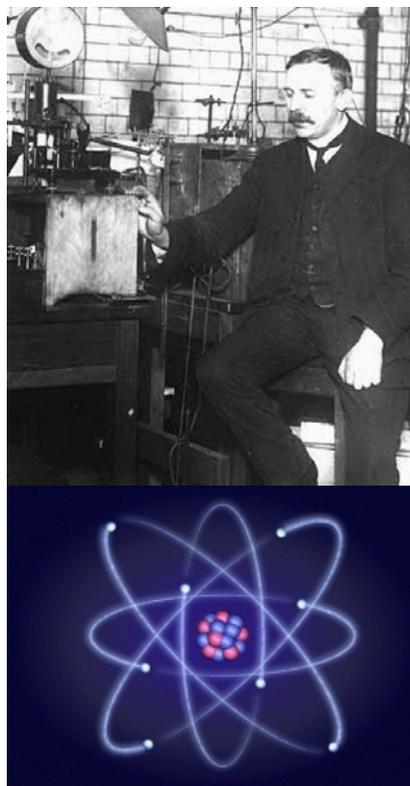


Рис. 4.1. Эрнст Резерфорд и его планетарная модель атома

Исследуя накопленные экспериментальные данные в 1913г. Г. Мозли обратил внимание на то, что порядковый номер элемента в таблице Д.И. Менделеева совпадает с зарядом ядра. В те времена химики считали, что элементы надо выстраивать по атомному весу.

Именно после экспериментов Мозли в обиход вошло понятие атомного номера. Это привело к некоторым изменениям в таблице Менделеева, например Ni и Co пришлось поменять местами, оставив между ними свободную клетку, в которую позже попал технеций.

Следующим важным шагом в ядерных исследованиях стало открытие в 1932 г. Чадвиком новой элементарной частицы, **нейтрона**, которая не имела электрического заряда и входила в состав атомных ядер.

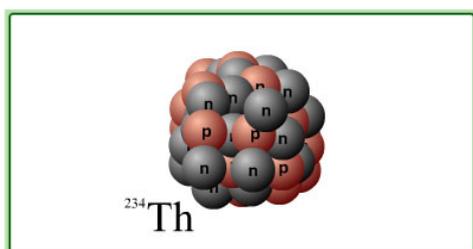


Рис. 4.2. Схема атомного ядра тория

С этого момента стало очевидным, что ядра всех атомов состоят из Z протонов p и N нейтронов n (рис. 4.2). Пары протонов и нейтронов стали называть нуклонами, число нуклонов в ядре равно $A = Z + N$.

Гейгер и Марсден на основании данных своих экспериментов по бомбардированию атомов золота ($Z = 79$) α – частицами с энергией $W_\alpha = 5$ МэВ, вычислили минимальное их сближение с ядрами, полагая взаимодействие чисто кулоновским

$$R_{\min} \approx \frac{2e \cdot Ze}{4\pi\epsilon_0 W_\alpha} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$

Это расстояние оказалось на четыре порядка меньше размеров всего атома, что говорило о невообразимо большой плотности ядерного вещества. Так, например, для золота ($A_{\text{Au}} \cong 197$) плотность ядра определится как

$$\rho_N = \frac{M}{V} = \frac{A \cdot m_n}{\frac{4}{3}\pi R_{\min}^3} \cong \frac{196 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-14})^3} \approx 10^{15} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Естественно, что вещество с такой плотностью представить в обыденной жизни затруднительно. Дело в том, что ядро атома является квантовым объектом, к которому не применимы некоторые классические представления.

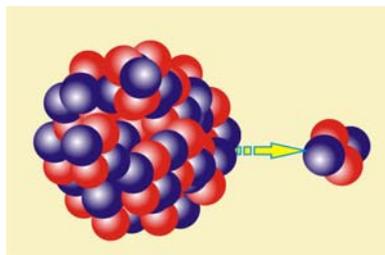


Рис. 4.3. Ядро и α – частицы

Эксперименты с α – частицами выяснилось, что их генерируют ядра радиоактивных веществ и представляют они собой дважды ионизированные ядра гелия, потому что состоят из двух протонов и двух нейтронов (рис. 4.3). Из этого следовало, что α – частицы входят в состав ядер. Используя гипотезу де Бройля можно определить длину волны, соответствующей этой частице

$$\lambda_\alpha = \frac{h}{\sqrt{2m_\alpha W_\alpha}} \cong 6 \cdot 10^{-15} \text{ м},$$

т.е. длина волны де Бройля сопоставима с размерами ядра, что говорит о квантовой принадлежности ядерных характеристик. Протоны и нейтроны близки по массе

$$m_p \cong 1,67239 \cdot 10^{-27} \text{ кг}; \quad p \cong + 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad m_n \cong 1,67460 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Оценим далее вероятность нахождения в ядре электрона, имеющего равный, практически, с протоном по модулю заряд, но обладающий в 1673 раза меньшей

массой. Вот странность то, до настоящего времени не разрешенная: **«Почему масса протона в 1673 раза больше, чем у электрона, а заряд по модулю одинаковый?»**. Найдём энергию электрона, соответствующую длине волны порядка размеров ядра

$$W_e = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{\hbar^2}{2m_e R_N^2} \cong 5 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ эВ}.$$

Потенциальная же энергия, обусловленная кулоновским взаимодействием электрона и ядра, составит

$$\Pi_e = \frac{Ze^2}{R_N} \cong 3 \cdot 10^6 \text{ эВ},$$

другими словами $\Pi_e \gg W_e$, т.е. электрон не может быть удержан в ядре кулоновскими силами.

Массу ядер ввиду её относительной малости принято выражать в специальных единицах, атомных единицах массы. Следует иметь в виду, что

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_{C^{12}} \cong 1,6582 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

На основании уравнения Оливера Хевисайда, связывающего массу и энергию, ($E = mc^2$) единицу атомной массы можно представить в электрон-вольтах $1 \text{ а.е.м.} = 931,44 \text{ МэВ}$.

Разность между массой ядра в а.е.м. и его массовым числом A называется дефектом массы ядра Δ

$$\Delta = \frac{M_{Z,A}}{(1/12)M_{C^{12}}} - A.$$

Протон и электрон. При исследовании катодных лучей Дж. Дж. Томсон заметил, что в трубке, наряду с движением отрицательных зарядов возникал и обратный поток, от положительного электрода к отрицательному. Томсон назвал этот поток «положительными лучами».

Резерфорд при экспериментах с α – частицами, предположил, что «положительные лучи» представляют собой ядра, лишённые полностью или частично электронных оболочек. Резерфорд высказал мнение, что в состав ядер входят частицы, подобные электрону, но с положительным зарядом, однако попытки выделить этот заряд Резерфорду, как впрочем, и другим исследователям, не принесли успеха.

Была надежда на ядро водорода, логично было предположить, что у водорода один электрон и ядро должно иметь такой же положительный заряд, но оказалось, что ядро водорода существенно массивнее электрона.

Напомним, что ядро водорода оказалось в 1837 раз тяжелее электрона при таком же положительном заряде.

Далее начались попытки выделить из ядра эту положительную частицу. Резерфорд назвал ядро водорода протоном, что значит «первый». Другие элементы имели более массивные ядра, чем у водорода. Так например, ядра гелия, имевшие массу в 4 раза большую, чем ядра водорода, должны были состоять из 4 протонов, ядра кислорода должны были включать в свой состав 16 протонов с зарядом +16, а на самом деле заряд ядра кислорода был равен только +8.

Появилось неверное предположение об электронах в составе ядер, но это никак не согласовывалось с возможностью удержания электронов кулоновскими силами. Появилась даже, так называемая протонно-электронная теория, которая, кстати,

объясняла появление изотопов. Предполагалось, что ядра могли иметь разное количество электронов, которые массы не меняли, а заряд был разным.

Например, кислород – 16 имел ядра, состоящие из 16 протонов и 8 электронов, кислород – 17 имел 17 протонов и 9 электронов, ядра кислорода – 18 содержали по 18 протонов и 10 электронов. Массовые числа ядер были соответственно равны 16, 17 и 18, а атомный вес составлял $(18 - 8)$, $(17 - 9)$, $(18 - 10)$, т.е. 8 в каждом случае. Ядро урана – 238 (U^{238}) по этой гипотезе должно было состоять из 238 протонов и 146 электронов, а ядра U^{235} должны состоять из 235 протонов и 143 электронов.

Идея была заманчива ещё и потому, что она объясняла стабильность ядер, взаимное кулоновское притяжение положительных и отрицательных зарядов казалось, было причиной стабильности и локализации.

Кроме всего прочего, при радиоактивном распаде ядер, излучались β – частицы, которые представляют собой поток электронов, напрашивался вывод об их постоянном присутствии в ядрах.

Протонно-электронная теория ядер достаточно изящно объясняла саму суть радиоактивности. Чем более массивны ядра, тем больше в них содержится протонов и электронов, у элементов с числом протонов больше 84, появлялась нестабильность, имеющиеся в ядре электроны не могли локализовать частицы в пространстве, и ядро начинало излучать.

По этой теории α – частица представляла собой 4 протона и 2 электрона. При потере α – частицы атомный номер поменяется с 4 на 2. Такое представление подтверждалось распадом U^{238} (атомный номер 92), который при испускании α – частицы превращался в торий Th^{234} с атомным номером 90. При испускании электрона масса ядра практически не изменяется, но теряется часть отрицательного заряда. Получалось, что T^{234} ($A = 90$) при испускании электрона превращался в протактиний Pa^{234} ($A = 91$). Как видно протонно-электронная теория достаточно убедительно комментировала многие внутриядерные процессы. Неудивительно, что ей пользовались в течение примерно 15 лет.

Был, однако, один, неприятный для этой теории момент, он был связан с тем, что массы ядер отличались друг от друга не на целые числа. С позиций протонно-электронной теории это было несколько странным, потому что отличались ядра на целое число протонов. Электроны ввиду их малой массы не в счёт. Получалось, что одно и то же количество протонов в разных ядрах имели различную массу.

Протон и нейтрон. В самом начале XX века перед учёными стояла очередная задача: имеет ли атомное ядро структуру, или это некое цельное образование? По сравнению с атомом ядро является чрезвычайно малым объектом, оно, имея диаметр порядка 10^{-15} м, в 10 000 раз меньше диаметра атома. Оказалось, что ядро, несмотря на свои ничтожные размеры, даже по атомным меркам, имеет сложную структуру. Оно состоит из частиц двух типов – протонов и нейтронов. Но до этого, как сказано выше существовала протонно-электронная теория строения ядер.

Задача о структуре и свойствах ядра возникла сразу после открытия Анри Беккерелем в 1896 г. радиоактивности. Напомним, что профессор Беккерель занимался действием флюоресцирующих веществ на фотопластинку, когда обнаружил, что соли урана, засвечивают фотопластинку, завернутую в чёрную бумагу. К этому времени уже было известно, что помимо электромагнитного излучения, вещество может испускать излучения, которые вызваны спонтанными превращениями атомов этих веществ в другие атомы. Радиоактивные вещества естественного происхождения испускали три типа излучений.

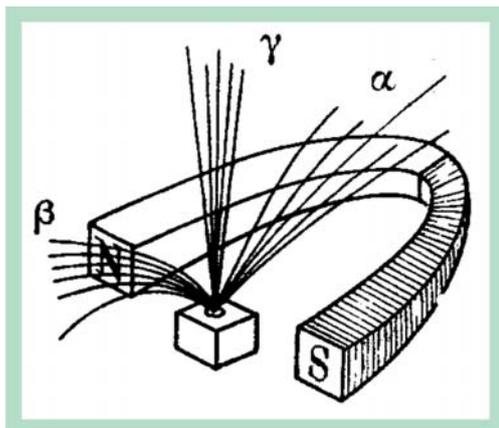


Рис. 4.4. Рисунок из диссертации М. Кюри

Приведенный рисунок (рис.4.4) впервые появился в 1903 г. в докторской диссертации Марии Кюри. С лёгкой руки Резерфорда три типа лучей получили название α -, β - и γ - лучей.

Испускание β - лучей обнаружил в 1898 уже упомянутый Беккерель и показал, что их свойства совпадали со свойствами катодных лучей, т.е. это поток быстрых электронов.

Резерфорд, в 1898 г. пришел к выводу, что излучение радиоактивных материалов при распаде ядер не однородно.

По проникающей способности он поделил излучение на три составных части:

- Излучение, едва проникающее за поставленный на его пути бумажный лист;
- Излучение второго вида было способно проникнуть за алюминиевую пластинку толщиной до 3 мм;
- Третью часть излучения не удалось обнаружить только за свинцовым экраном толщиной несколько сантиметров.

Особо не мудрствуя, Резерфорд присвоил им названия по трём первым буквам греческого алфавита, соответственно: α - излучение; β - излучение и γ - излучение. Было обнаружено так же, что излучение расщепляется на три составных части в магнитном и электрическом поле, причём γ - составляющая с магнитным и электрическим полем не взаимодействует (рис. 4.5).

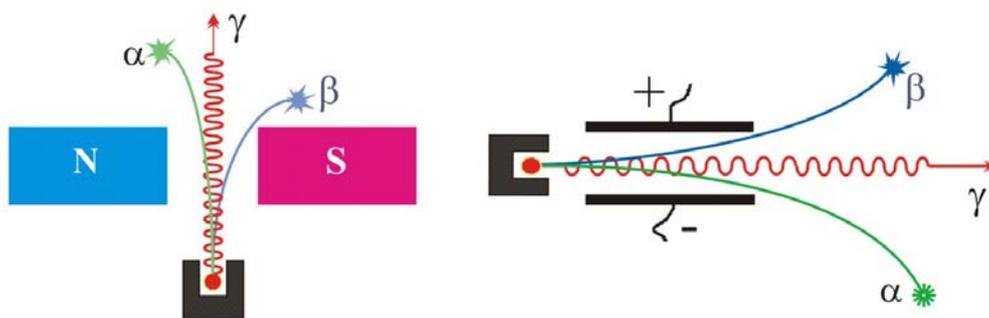


Рис. 4.5. Взаимодействие излучения с полями

4.2. Естественные и искусственные ядерные превращения

Таким образом, исследователи пришли к выводу, что β – излучение представляет собой поток лёгких, отрицательно заряженных частиц с относительно малой величиной энергии. Как оказалось, β – излучение представляет собой поток электронов.

α – излучение тоже является потоком более массивных частиц, но заряженных положительно. α – частицы, как выяснилось позже, являются дважды ионизированным атомом гелия, т.е. ядрами гелия.

Третья компонента, γ – излучение. Оно обладает огромной проникающей способностью и является, по сути, потоком, γ – квантов, т.е. квантов (порций) жёсткого электромагнитного излучения высокой частоты.

Французский учёный Поль Вийяр в 1901 г. установил, что третий компонент «урановых лучей» никак не взаимодействует с электромагнитным полем и походит по своим свойствам на X – лучи Рентгена.

Несмотря на то, что обсуждаемые виды излучения имеют корпускулярно – волновую природу, т.е. они, строго говоря, – дуальны. Далее, для простоты изложения, будем считать их потоком частиц.

При радиоактивном излучении энергия α –, β – и γ – частиц имеет порядок $W_N \approx 1 - 10$ МэВ, в то время как, энергия связи внешних электронов имеет порядок $W_e \approx 6 - 10$ эВ, а энергия химических превращений и того меньше – $W_{Cs} \approx 2 - 5$ эВ.

Вполне объяснимо, что получив такие энергетические оценки, человечество отставило всё прочие свои научные забавы и с настойчивостью рашпиля набросилось на покорение ядра. Перспективы буквально захватывали дух учёных, в алчных сообществах политиков и военных уже строились планы мирового господства.

При рассмотрении ядерных процессов заряд ядра, как и прежде, обозначается через Z , а массовое число (округлённый атомный вес) – A . Значение A обозначается верхним индексом, а величина Z – нижним индексом, т.е. A_ZX или X_Z^A .

Ядро атома водорода при выборе такой символики обозначается как H_1^1 , т.е. это элемент с $Z = 1$ и атомным весом 1,008 ($A = 1$). α – частица, будучи ядром атома гелия обозначится как, He_2^4 или α_2^4 , при этом ясно, что $Z = 2$, $A = 4$ (4,00388). Применяя эту нехитрую символику можно достаточно наглядно представить процесс радиоактивного распада.

Уравнение α – распада, когда «материнское» ядро испускает α_2^4 и превращается в ядро другого элемента, можно записать



Очевидно, что дочерний элемент Y , атомный номер которого на две единицы меньше атомного номера материнского ядра, должен находиться относительно X в таблице Д.И. Менделеева левее на две клетки.

Уравнение β – распада, сопряжённого с испусканием электронов e_{-1}^0 представится следующим образом



Заряд материнского ядра увеличивается на единицу, а массовое число не меняется, элемент Y , образующийся в результате β – распада элемент сдвинут относительно ядра X вправо на одну клетку.

Записанные соотношения выражают **правило радиоактивного смещения**. Следует отметить, что при распаде ядер не утрачивает силы законы сохранения импульса, энергии и заряда. Образующееся ядро Y тоже может быть неустойчивым, и будет распадаться дальше.

Показательным, в этом смысле, является пример распада урана (U_{92}^{238}), которое, выбрасывая α – частицу, с максимальной энергией $W_{\alpha(\max)} \cong 4,2\text{МэВ}$, превращается в изотоп тория



который в таблице Д.И. Менделеева занимает положение на две клетки левее материнского элемента.

Ядро тория Th_{90}^{234} не является стабильным, оно испытывает дальнейший распад, испуская β – частицу с энергией $W_{\beta(\max)} \cong 0,2\text{МэВ}$ и мягкий γ – фотон с энергией $W_\gamma = h\nu \cong 0,093\text{МэВ}$, превращаясь в изотоп протактиния



Ядро протактиния далее ($A=234, Z = 91$) испускает ещё одну α – частицу с энергией $W_{\alpha(\max)} \cong 2,32\text{МэВ}$ и ещё один γ – фотон с энергией $W_\gamma \cong 0,8\text{МэВ}$, превращаясь в изотоп урана



U_{92}^{234} тоже радиоактивен и, распадаясь далее, переходит в очередной радиоактивный элемент ионий – изотоп тория.

Каждый элемент из радиоактивного семейства испускает α – частицу или β – частицу не одновременно, а последовательно. Образец чистого U_{92}^{238} испускает только α – частицы, но через непродолжительное время можно фиксировать все три вида излучения, т.к. в образце присутствуют несколько элементов семейства.

Существует несколько семейств радиоактивных элементов, общим для них является, то, что расположены они в самом конце таблицы Менделеева за свинцом Pb_{82}^{207} . Ядро свинца является самым тяжёлым из устойчивых ядер.

Процесс естественного распада ядер протекает самопроизвольно и не подвержен внешним влияниям. Поскольку в распаде одновременно участвуют множество ядер одновременно, то явление имеет статистический смысл.

Скорость распада радиоактивных элементов принято характеризовать промежутком времени, за который распадается половина всех ядер, это время T называется **периодом полураспада**.

Так, например, период полураспада полония Po_{84}^{210} составляет $T = 140$ суток, это значит, что от 1 кг полония в результате распада останется 500 г, а ещё через 140 дней – 250 г и так далее.

Таким образом, вероятность распада ядер полония, впрочем, как и всех других неустойчивых ядер, остаётся неизменной. Не распавшиеся за определённое время ядра имеют те же свойства, что и исходные ядра, т.е. процесс не является результатом эволюции ядер. Ядра не подвержены «старению».

Количественная оценка радиоактивного распада делается в предположении, что число распавшихся ядер за достаточно малый промежуток времени, всегда

пропорционально исходному числу не распавшихся ядер. Если в некоторый момент времени t число ядер данного типа было $N(t)$, то уменьшение общего числа ядер $-dN$ за время dt определится следующим образом:

$$-dN = kN(t)dt,$$

где $k = -dN/N$ — постоянная распада при $dt = 1$. Другими словами, постоянная радиоактивного распада равна вероятности распада одного ядра за единицу времени. Разделим в дифференциальном уравнении переменные

$$\frac{dN}{N(t)} = -kdt, \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N(t)} = -k \int_0^t dt,$$

откуда

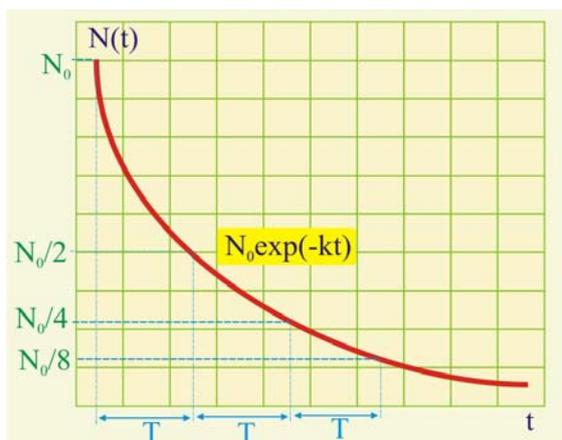


Рис. 4.6. Кривая полураспада

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kt \text{ или } N = N_0 e^{-kt},$$

где N_0 — число ядер в момент времени $t = 0$. Из уравнения (4.7) видно, что число ядер радиоактивного исходного элемента убывает во времени по экспоненциальному закону (рис.4.6). Число распадов в единицу времени определится как

$$a = -\frac{dN}{dt} = kN,$$

величина a называется **активностью** данного радиоактивного препарата. В качестве единицы активности исполь-

зуется кюри:

$$1 \text{ кюри} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ событий /с.}$$

Эта величина соответствует примерно активности 1 г радия, активность которого соответствует 0,994 кюри. Уравнение распада позволяет установить взаимосвязь между постоянной распада и периодом полураспада

$$N(T) = N_0 e^{-kT} = \frac{1}{2} N_0,$$

откуда следует, что

$$e^{-kT} = \frac{1}{2}, \Rightarrow T = -\frac{1}{k} \ln \frac{1}{2} = \frac{\ln 2}{k} \cong \frac{0,693}{k}.$$

Периоды полураспада радиоактивных различных элементов отличаются, друг от друга в весьма широких пределах — от миллионных долей секунды до нескольких миллиардов лет. В табл. 4.1 приведены периоды полураспада некоторых активных изотопов.

Таблица 4.1

Z	Изотоп	A	$T_{1/2}$
1	Водород	3	12,3 г
6	Углерод	14	5730 г
7	Азот	13	10 мин
8	Кислород	15	124с
11	Натрий	22	2,6 г
		24	15 ч
15	Фосфор	32	14,3 сут
16	Сера	35	87 сут

17	Хлор	36	$3 \cdot 10^5$ г
		38	38 мин
19	Калий	42	12,4 ч
20	Кальций	45	164 сут
23	Ванадий	48	16,1 сут
26	Железо	59	45 сут
27	Кобальт	60	5,26 г
29	Мель	64	12,8 ч
30	Цинк	65	246 сут
33	Мышьяк	76	26,8 сут
35	Бром	77	38,8 сут
36	Криптон	85	10,6 г
38	Стронций	89	54 сут
51	Сурьма	124	60 сут
55	Пезий	137	30 г
74	Вольфрам	185	74 сут
79	Золото	198	2,7 сут
84	Полоний	210	138,4 сут
88	Радий	226	1601 г
92	Уран	234	$2,5 \cdot 10^5$ г

Конечным продуктом любой последовательности распадов является изотоп с устойчивым ядром, который образуется постепенно по мере распада материнских ядер. Например, активный уран U_{92}^{238} – превращается в свинец Pb_{82}^{206} за 9 миллиардов лет. Измерение уровня естественной радиоактивности горных пород положено в основу оценки возраста археологических находок.

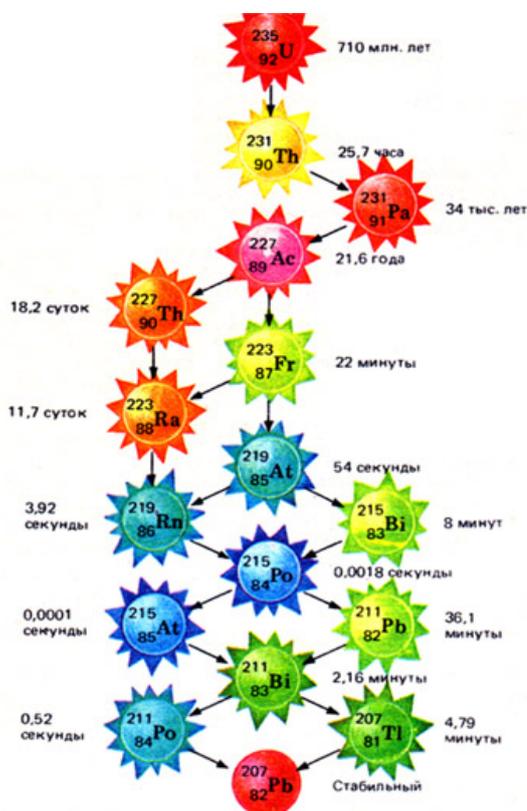


Рис. 4.7. Естественный распад урана U_{92}^{235}

Как отмечено выше, цепочка последовательных превращений включает в себя ряд элементов которые, отличаются от обычных только массой ядер, они называются **изотопами**.

На рис. 4.7. приведена цепочка превращения ядер урана U_{92}^{235} в стабильные ядра свинца. На схеме приведены периоды полураспада в соответствующих единицах.

Ядра изотопов содержат одинаковое число протонов и разное число нейтронов, поэтому заряд ядра у изотопов одинаков, что обуславливает одинаковость структуры их электронных оболочек.

Протон представляет собой ядро простейшего элемента – водорода. Протон имеет положительный заряд, совпадающий поразительным образом по величине с зарядом электрона, а вот масса, как отмечалось ранее, протона в 1836,13 раз больше массы электрона

$$m_p \cong 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Отметим ещё раз, что последнее обстоятельство делает окончательно неясным фундаментальный смысл электрического заряда. **Непонятно, каким образом частицы электрон и протон, имея одинаковый по модулю заряд, различаются столь значительно по массе.**

Число протонов в ядре определяет его заряд. Протон относится к барионам и имеет спин, равный $s = \pm 1/2$ и подчиняются статистике Дирака – Ферми. Протон достаточно стабильная частица, период его существования оценивается в 10^{26} – 10^{27} лет. Совместно с нейтроном протон образует группу из двух частиц – **изотопический дуплет, именуемый нуклоном (N)**.

Протон, при сообщении ему энергии, может проникать в вещество, что сопровождается уменьшением энергии. Наличие у протона положительного заряда позволяет путём ионизации атомарного водорода получать высоко энергетичные потоки частиц. Протоновые пучки являются основным инструментом при исследовании свойств ядер и элементарных частиц.

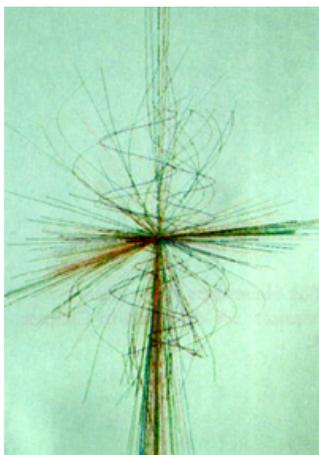


Рис. 4.8. Треки протонов

Новый вид радиоактивных излучений был открыт в начале 30-х годов при бомбардировке бериллия α – лучами. С помощью ионизационной камеры Чедвик показал, что это излучение состоит из тяжелых нейтральных частиц.

Изучение с помощью камеры Вильсона показало, что треки испускаемых бериллием частиц были невидимы, – следовательно, они не ионизировали молекул воздуха, но были видны треки ядер – протонов (рис. 4.8), испытавших столкновения с такими частицами. Новые частицы были названы **нейтронами**. Их масса оказалась приблизительно равной массе протона.

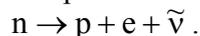
Нейтрон явился своеобразным ключом, открывшим путь к запасам ядерной энергии. Сейчас о нейтроне известно достаточно многое:

Он лишен заряда, его масса $m_p = 1,008665$ а.е.м. незначительно – примерно на две электронных массы – превышает массу протона, его спин равен спину протона, а все ядра представляют собой плотную упаковку из смеси протонов и нейтронов.

Гипотеза о протонно-нейтронной структуре ядра была выдвинута сразу же после открытия нейтрона несколькими учеными почти одновременно: советским физиком Д. Д. Иваненко и Вернером Гейзенбергом.

Гарольд Юри в 1932 г., открыл тяжелый изотоп водорода – **дейтерий**, ядра которого представляют собой связанное состояние протона и нейтрона.

В свободном состоянии нейтрон довольно быстро, с периодом полураспада 10,7 мин, распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино по схеме



В ядре нейтрон связан прочными ядерными силами и, как правило, стабилен, но иногда испытывает распад по обычной схеме, причем протон остается в ядре, а электрон и антинейтрино излучаются. Именно эти электроны воспринимаются как β – лучи.

Ядерные силы существенно меняют свойства нейтронов и в зависимости от типа ядра период его β – распада может быть самым разным: от сотых долей секунды до нескольких миллиардов лет.

Интересно и непонятно, почему нейтрон обнаружили так поздно, Резерфорд и Харкинс предсказали его еще в 1920 г, для его открытия не нужно было ничего, кроме привычных α – частиц, и, тем не менее, лишь десять лет спустя ученые приступили к этому очередному феномену микромира.

В 1930 г. ученик Макса Планка Вальтер Боте совместно с Г. Беккером, продолжая традицию исследований ядерных реакций, начатую в 1919 г. Резерфордом, облучали уже традиционными для лабораторий, α – частицами бериллий.

Они обратили внимание на то, что материнские ядра исторгали из себя не протоны, а какое-то другое излучение, которое проходило даже через слой свинца толщиной в 2,5, см. **Это было удивительным, учитывая размеры ядер свинца и их достаточно большой электрический заряд.**

Было высказано предположение, что это жесткое γ – излучение возбужденного ядра бериллия, которое никак не реагирует на электромагнитные внешние воздействия.

Дальнейшие исследования, однако, показали, что с точки зрения проникающей способности, нейтроны ведут себя совершенно иначе, чем любой другой вид излучения, будь то электромагнитная волна или заряженные частицы.

Нейтроны вообще «не замечают» внешних атомных электронов, а сталкиваются только с ядром. При этом при взаимодействии с ядрами в одних случаях нейтрон просто сталкивается с ядром, а в других случаях ядро захватывает нейтрон, вследствие чего оно взрывается и испускает другие частицы.

В этом месте нужно немного подробнее. Два года спустя после открытия нейтрона супруги Жолио-Кюри продолжили исследования природы нового излучения. Направив это «нечто» на мишень из парафина, они обнаружили протоны, которые с большой энергией покидали парафиновую мишень.

Вывод напрашивался сам собою: открыт «новый способ взаимодействия излучения с материей», посредством которого « γ -кванты» Боте и Беккера весьма эффективно выбивают не только протоны из атомов водорода, входящих в состав парафина, но даже ядра углерода.

Джеймс Чедвик, любимый ученик Резерфорда, который вместе с учителем подсчитывал сцинтилляции при рассеянии α – частиц атомами золота, во время длинных бесед в полной темноте унаследовал идею возможного содержания в ядрах атомов некой нейтральной по электрическим свойствам частицы.

Впоследствии Чедвик даже предпринял несколько попыток обнаружить нейтрон. Они оказались не совсем удачными. Но идея не умерла, и узнав об опытах Жолио-Кюри, он уже через месяц понял, что Боте и Беккер наблюдали ядерную реакцию превращения бериллия в углерод с испусканием нейтрона:

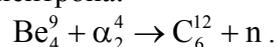


Рис. 4.9. Джеймс Чедвик

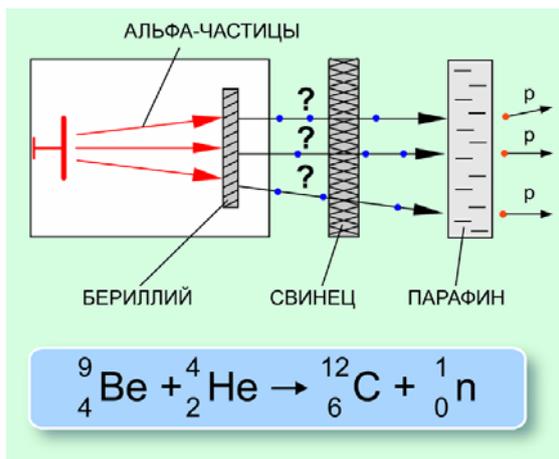


Рис. 4.10. Схема открытия нейтрона

электрон и антинейтрино. В этой связи нейтроны в природе и лабораториях возникают только при ядерных превращениях.

К настоящему времени установлено, что отсутствие заряда у нейтрона не есть факт абсолютный, хотя с позиций закона сохранения электрического заряда всё чисто. Наиболее точный метод измерения заряда заключается в регистрации отклонения нейтронов поперечным электрическим полем. Эти измерения показали, что заряд нейтрона составляет $6 \cdot 10^{-12}$ элементарного заряда ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), т.е. заряда электрона.

Путём косвенных опытов и статистических оценок определили, что нейтрону можно сопоставить область пространства с характерным размером $8 \cdot 10^{-15}$ м.

В соответствии с одной из современных гипотез, **нейтрон является сложной частицей, состоящей из положительно заряженной середины и отрицательной оболочки**, причём, эти составные элементы имеют энергию связи такой величины, что её невозможно разрушить современными средствами.

В результате взаимодействия ядер с нейтронами они могут выбрасывать α – частицы. С помощью α – частиц можно вышибать из ядер и протоны. До 1932 г. эти факты в биографии ядра оставались без теоретического объяснения. Считалось, что в состав ядра входят всего две элементарные частицы: электрон и ядро водородного атома – протон. Значения атомных весов в виде целых чисел, говорили о том, что ядра атомов, построены из аналогичных частиц.

Например, атом гелия He_2^4 тяжелее атома водорода в четыре раза. Ну почему бы, в этой связи, не считать, что атом гелия состоит из четырех водородных атомов. Вполне логично. Полагалось, что четыре протона и два электрона входят в состав ядра, остальные два электрона обеспечивают значение веса в виде целого числа.

С другой стороны, β – распад наводил на мысль, что в составе ядра есть электроны, откуда-то же берётся их поток? Однако это заманчивое предположение было быстро развенчано, т.к. выяснилось, что такое представление о строении ядра приводило к ряду серьёзных противоречий с достоверными данными экспериментов.

Тонкое расщепление спектральных линий предполагало взаимодействие между магнитным моментом ядра и орбитальным током, генерируемым орбитальным движением электронов. Если это так, то по сверхтонкому расщеплению линий, можно определить магнитный момент ядер.

В опытах же супругов Жолио-Кюри наблюдалось рассеяние протонов при столкновении с нейтронами, подобное классической схеме соударения бильярдных шаров.

В свободном виде нейтроны могут существовать относительно коротковременно, всё зависит от свойств среды, ядра которой поглощают нейтроны. В плотных средах время жизни нейтронов измеряется микросекундами. Кроме того, свободный нейтрон обладает β – радиоактивностью, т.е. неминуемо распадается на протон,

Выяснилось, он примерно совпадает с магнитным моментом протона. Измерения магнитных моментов ядер методом парамагнитного резонанса показало, что магнитный момент протона в 657,5 раза больше.

Это обстоятельство объяснялось возможностью компенсации моментов электронов. Для ядер, которые, содержат четное число электронов, спины электронов внутри ядер попарно компенсируются. Например, у гелия He_2^4 , у углерода C_6^{12} , электронов соответственно 2 и 6.

Предполагалось, что магнитные моменты половины электронов, входящих в состав ядер направлены в противоположную сторону остальным. Всё бы хорошо, но для ядра азота такую компенсацию получить нельзя: для семи электронов один спин, по крайней мере, остается сам по себе. А между тем магнитный момент ядра азота, как и у других ядер, много меньше магнитного момента электрона и не отличается по порядку величины от магнитных моментов других ядер.

Противоречия новоявленной теории были разрешены сразу после открытия нейтрона. После появления первых сведений о нейтроне, Д. Д. Иваненко и Е. Н. Гапон высказали гипотезу о том, что ядра атомов состоят только из протонов и нейтронов. Такая структура ядра объясняла малый магнитный момент ядер, а также вывод о четном числе элементарных частиц в ядре азота: согласно этой гипотезе, ядра азота N_7^{14} содержат 7 протонов и 7 нейтронов.

Последующие измерения подтвердили, что спин нейтрона, так же как у протона и электрона, равен $s = 1/2$. Несмотря на отсутствие электрического заряда, у нейтрона оказался магнитный момент, по порядку величины близкий к магнитному моменту протона.

При таком подходе, достаточно простой физический смысл приобретает массовое число A , оно дает число нуклонов – частиц, входящих в состав ядра. Число нейтронов определяется так:

$$N = (A - Z),$$

Таким образом, **изотопы отличаются числом нейтронов в ядре**. Водород имеет три изотопа с массовыми числами A , равными соответственно 1, 2 и 3. Ядро легкого изотопа H_1^1 состоит из одного протона. Этот изотоп называется протием. Тяжелый водород H_1^2 , иначе называемый **дейтерием** и обозначается символом D . Ядро дейтерия имеет заряд $Z=1$ и массовое число $Z = 2$.

Для упрощения процесса записи ядерных превращений принято обозначать ядра элементов химическими символами соответствующих им изотопов (верхний индекс – массовое число, нижний – электрический заряд в единицах заряда электрона.).

Третий изотоп водорода H_1^3 называется **тритием** (T) и имеет заряд $Z = 1$ и массовое число $Z = 3$. Тритий β – радиоактивен, с периодом полураспада 12,5 года. К настоящему времени получено более 270 искусственных нуклонов, это, как правило, за урановые элементы.

Сравнение размеров ядра и его составных частей позволяет предположить, что протоны и нейтроны упакованы плотно, а значения атомных весов в виде целых чисел говорит о возможности считать массу ядра, в первом приближении, пропорциональной числу нуклонов:

$$M \cong \bar{m}A,$$

где $\bar{m} = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг – средняя масса одного нуклона.

О размерах ядра говорить, как это принято для макрообъектов, не представляется возможным, потому что все методы и средства оценки размеров, во-первых,

косвенные, во-вторых, имеют вероятностный характер. Фиксируется либо наличие ядерного вещества по силовым проявлениям, либо реакция этого вещества на электромагнитные поля. Оба этих способа, кстати сказать, дают существенно разные результаты. В первом приближении ядро можно считать сферическим

$$R \approx r_0 \sqrt[3]{A}.$$

Для ядер тяжёлых элементов в ходе экспериментов установлено: $r_0 \cong (1,2 - 1,5) \cdot 10^{-15}$ м, это принято за особую ядерную единицу – Ферми. Из следует, что объём ядра пропорционален числу нуклонов, значит и плотность ядерного вещества для ядер различных элементов одинакова и равна

$$\rho_{\text{я}} \approx 1,45 \cdot 10^{14} \text{ кг/м}^3.$$

Один единственный кубический сантиметр ядерного вещества имел бы массу $M \approx 145\,000\,000\,000$ кг. Не хило, да?

Одной из главных заморочек ядерной физики является вопрос о силах, удерживающих нуклоны в ядре в непосредственной близости, как одно целое. Как может показаться сначала не просвещённому – ядро вообще должно было бы разлететься.

В природе, оно состоит только из одноименно заряженных и нейтральных частиц. Даже школьники, с ну очень средним образованием знают, что, в соответствии с законом Кулона, одноимённые заряды не имеют обыкновения находиться в равновесии. А ядра в определённом смысле представляются образованиями стабильными.

Снова возникает явление, которое не укладывается в рамки известных законов. Поскольку нейтроны и протоны стабильно соседствуют, то должны быть причины побуждающие их к такому состоянию. Предположим, что внутри ядра действует особый класс сил, так называемые **ядерные силы**.

Ядерные силы. Этот гипотетический тип сил отличается от электростатических и всех других известных сил. Важнейшей их особенностью является короткий радиус действия. Напомним, что электростатическое и гравитационное взаимодействие, убывает по мере возрастания расстояния, обратно пропорционально квадрату расстояния

$$F_{\text{к}} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{1,2}^2}, \quad F_{\text{г}} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{1,2}^2}.$$



Рис. 4.11. Хидеки Юкава

Радиус действия этих сил всегда очень велик, по ядерным масштабам, и они подчиняются принципу суперпозиции. Таким образом, сообщив электрический заряд большим изолированным телам, мы можем в миллионы раз усилить действие отдельного электрона. Точно так же лишь в результате аддитивного сложения взаимодействий всех атомов земного шара «создается» сила тяжести, которую мы ощущаем в нашей повседневной жизни.

Ничего подобного не наблюдается у ядерных сил, радиус их действия не превышает радиуса ядра. В пределах этой области ядерное взаимодействие можно в грубом приближении сравнить с притяжением двух разноименных электрических зарядов величиной $q = 3e$. Для точечного источника сильного взаимодействия потенциал определится соотношением профессора Юкавы (рис. 4.11)

$$\Phi(r) = -g \frac{e^{-\mu r}}{r},$$

где $\mu = 1/\lambda_C$ - величина, обратная длине волны Комптона. Энергия взаимодействия двух нуклонов, таким образом, в зависимости от расстояния, примет вид

$$U = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}.$$

Зависимость $U = f(r)$ для двух нуклонов приведена на рис. 4.12. Ядерные силы, в отличие от кулоновских, (красная кривая) убывают не обратно пропорционально квадрату расстояния, а значительно быстрее, по закону экспоненты; они начинают действовать лишь тогда, когда частицы почти соприкасаются.

В весьма фривольном приближении можно уподобить нуклоны карамельным шарикам, которые «слипаются» друг с другом при непосредственном контакте. Те, которые тают не во рту, а в руках. Опыт общения со слипшимися конфетами подсказывает, что величина связывающей их силы совершенно не зависит от того, сколько их находится в кулке.

При дальнейшем сближении частиц величина ядерных сил достигает некоторого предела. Если бы такого предела не существовало, ядро сжалось бы в точку, так как только при этом условии потенциальная энергия ядра стала бы равной нулю.

Поскольку такой «коллапс» в действительности не происходит, потенциал не убывает неограниченно и притяжение должно уступить место сильному отталкиванию. Таким образом, в нуклоне существует некая «твердая сердцевина», или «кern», радиус которого не превышает $4 \cdot 10^{-16}$ м.

Теория ядерных сил к настоящему времени далека от завершения, однако целый ряд их качественных и количественных характеристик определен вполне надёжно.

Все известные к настоящему времени поля материальны, поэтому можно считать, что и источником ядерного поля служат материальные объекты.

Напомним, что источниками электромагнитного поля являются любые частицы вещества – электроны, протоны и т. д., обладающие электрическим зарядом. Такая же ситуация и с гравитационным взаимодействием. **То, что обладает массой, то испытывает гравитационное взаимодействие, исключений нет.**

Очевидно, что источниками ядерного поля являются нуклоны. Они обладают своеобразным «ядерным зарядом», одинаковым по величине и знаку у всех нуклонов (нейтрон + протон) независимо от того, обладает ли нуклон еще электрическим зарядом или нет.

Природа ядерных сил явно не электрического свойства, потому, что ядерные силы между частицами не зависят от того, обладают ли частицы электрическим зарядом или нет. Кроме того, ядерное взаимодействие нейтрона с нейтроном, нейтрона с протоном и двух протонов одинаково.

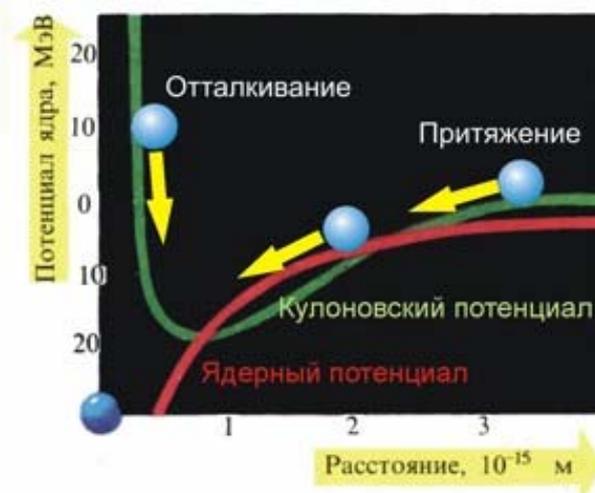


Рис. 4.12. Ядерные силы взаимодействия

Ядерные силы, в отличие от сил между точечными или сферическими электрическими зарядами, не являются центральными. Их нельзя представлять в виде сил, действующих от одного центра сил. Это связано с наличием спина взаимодействующих частиц.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, подобно химическим силам. Действительно, атомы углерода и кислорода взаимодействуют, образуя углекислый газ CO_2 . Но как только, происходит соединение одного атома углерода и двух атомов кислорода, «свадьба» заканчивается и присоединение новых атомов кислорода не происходит – химические силы достигли насыщения.

Эффект насыщения ядерных сил, происходит более плавно нежели в химическом случае. Энергия, которую необходимо затратить в среднем на одну частицу, для того чтобы разбить ядро на отдельные нуклоны, начиная от гелия и до самых тяжелых ядер, меняется в пределах, не превышающих 25%.

Гипотезы о возникновении ядерных сил. Существует несколько гипотез о механизме возникновения ядерных сил. В соответствии с одной из них, внутри ядра существует поле, подчиняющееся квантовым законам, в частности это относится к полю сил, действующих между двумя нуклонами.

Возникает отнюдь не риторический вопрос, какие частицы переносят это взаимодействие? Предполагается, что переносчиками поля являются частицы – переносчики, которые, к слову сказать, пока в земных условиях не обнаружены. Но вместе с тем, объяснение такого взаимодействия через вспомогательное поле транспортных частиц не только не «притянута за уши», но и является необходимым элементом при описании других видов взаимодействия.

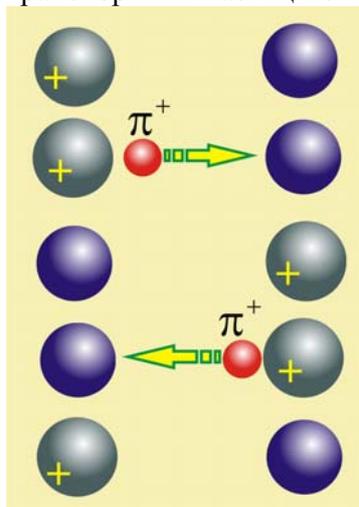


Рис.4.13. Переносчики поля
 π – мезоны

Тот факт, что эти частицы пока укрываются от экспериментаторов, совершенно не смущает теоретиков. Такой уж они упёртый народ. Допускается, что если даже окажется так, что частицы – переносчики не существуют в данный момент в «осязаемой» форме, вполне оправдано допустить их существование в виртуальной форме.

Схема «работы» таких частиц выглядит следующим образом: протон генерирует такую положительно заряженную частицу (рис.4.13), которая тут же поглощается соответствующим нейтроном, которому она «предназначена». Нейтрон превращается в протон, тогда как бывший протон теряет свой заряд и становится нейтроном.

Затем эта «игра в кошки мышки» повторяется в обратном порядке, так, что в конце концов между двумя нуклонами происходит непрерывный обмен частицами.

Таким образом, существование частицы – переносчика ограничено промежуток времени, который необходим для преодоления расстояния между двумя нуклонами (то есть радиуса действия ядерных сил). Отсюда $\Delta t \cong r_i/c$ при условии, что частица движется со скоростью света c . Если $r_i \cong 1 \cdot 10^{-15}$ м, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, то $\Delta t \cong 3,3 \cdot 10^{-24}$ с. В соответствии с принципом неопределённости для энергии можно записать следующее соотношение

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar .$$

Оценим приближённо величину этой энергии

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} \cong \frac{10^{-34}}{3,3 \cdot 10^{-24}} \cong 3 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cong 190 \text{ МэВ},$$

Энергия, прямо скажем, впечатляющей величины, особенно с учётом её эквивалентности некой массе, в соответствии с теорией Оливера Хевисайда

$$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2} \cong 3,3 \cdot 10^{-28} \text{ кг},$$

что составляет примерно 276 масс электрона. Обсуждаемая частица с фантастическими свойствами была предсказана Японским физиком Хидеки Юкавой в 1935 г.

Буквально годом позже **частицы Юкавы были найдены в космическом излучении**; их назвали π – мезонами. Масса этих частиц составляла 273,3 массы электрона.

Это удивительно близко к результатам оценки, но такое совпадение, в некоторой степени, случайно: величина τ_i была выбрана более или менее произвольно. Конечно, и обмен мезонами не следует понимать чересчур буквально: это не более чем попытка описать на простом языке частиц явления, весьма далекие от наглядности.

Дефект массы и энергия связи ядер. Ядра всех элементов составлены из одинаковых протонов и нейтронов, это давало основание до поры считать, что для определения массы ядра достаточно сложить массы всех, входящих в ядро, частиц.

В классической физике аддитивность массы не вызывала сомнений в виду полнейшей очевидности.

Применительно к ядру всё оказалось сложнее. Было установлено, что масса ядра не равна в точности сумме масс нуклонов.

Чтобы удалить протон или нейтрон из сложного устойчивого ядра, необходимо затратить некоторую энергию. Убыль энергии при объединении частиц в ядро эквивалентна, согласно соотношению Хевисайда **$E = mc^2$** , уменьшению массы.

Масса образующегося ядра меньше суммарной массы составляющих его частиц. Например, наибольшая потеря массы получается при образовании атома гелия. Сумма масс частиц He_2^4 равна: 2 протона + 2 нейтрона + 2 электрона = 1 атом гелия = $(2 \cdot 1,00727 + 2 \cdot 1,00865 + 2 \cdot 0,00055 = 4,03294 \text{ а.е.м.})$, а по табличным данным масса атома гелия равна 4,00261 а.е.м.

Атомная масса гелия оказывается на 0,3033 а.е.м. меньше. Такая характерная особенность наблюдается для любого нуклида. Масса целого атома всегда получается меньшей суммы масс составляющих его частей. Это явление называется **дефектом масс**.

Данный эффект имеет совершенно простое и очевидное объяснение. Ядра атомов представляют собой сложные образования, возникшие в процессе зарождения Солнечной системы.

Ядра существующих в настоящее время элементов образовались путем слияния элементарных частиц. Как и в большинстве, самопроизвольно протекающих процессов, это объединение сопровождалось минимизацией энергии; часть энергии при этом высвобождалась.

Поскольку чудеса в Мире встречаются редко, то и в данном случае источником энергии могли быть только объединяющиеся частицы. Высвобождение энергии неизбежно должно было привести к уменьшению их массы.

Количественно точная величина этого «изъятия» в каждом отдельном случае вновь определяется из соотношения Хевисайда. Оценим энергетический эквивалент массы для ядра гелия, которое представляет собой, по сути, α - частицу

$$E = \Delta mc^2 \cong 28,2 \text{ МэВ.}$$

Для сравнения отметим, что количество тепла, выделяющегося при сгорании одного моля топлива, примерно в миллион раз меньше.

Чтобы α – частица распалась, необходимо подвести к нему энергию не меньшую чем E . α – частица образование чрезвычайно устойчивое, поэтому при спонтанном распаде ядра α – частица генерируется как целый объект.

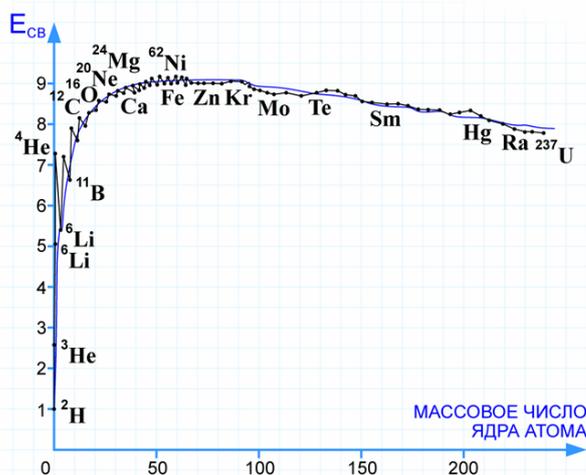


Рис. 4.14. Удельная энергия связи

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре, называется **удельной энергией связи**. На рис. 4.14 представлена зависимость энергии связи в зависимости от массового числа A ядра.

Сильнее всего нуклоны связаны в ядрах элементов с массовыми числами $A = 50 - 60$. Максимальная энергия связи для этой группы достигает 8,7 МэВ/нуклон и при дальнейшем росте A энергия постепенно убывает. Для урана U_{92}^{238} удельная энергия связи составляет примерно 7,5 МэВ/нуклон.

Не безынтересно, с позиций энергии связи, окинуть взором всю таблицу элементов. Если сравнить энергии связи с теми, что высвобождаются при объединении атомов в молекулы или в других процессах, происходящих в атомных оболочках, то очевидно, что **ядерные энергии в миллионы раз превышают энергии последних**. Именно поэтому дефекты масс в химических или других подобных процессах столь малы, что практически их невозможно измерить. Для этих процессов справедлив классический закон сохранения массы в своей обычной форме.

На рис. 4.15 приведенные относительные сравнительные энергии некоторых частиц и квантов излучения.



Рис. 4.15. Сравнение энергий некоторых частиц и квантов

За единицу принята энергия, высвобождаемая при окислении одной молекулы углеводородного топлива. Энергия кванта ультрафиолетового излучения в 100 раз больше, квант рентгеновского излучения уже в 10^6 раз больше, а одна α – частица с энергией в 4,2 МэВ превосходит единицу в 10^8 раз. Комментарии, как говорится, излишни.

Дейтерий. Один из изотопов водорода, с массой вдвое превышающей массу протона, сыграл в ядерной физике исключительную роль. Ядро этого изотопа получило название – **дейтрон** (D), что означает – второй. Дейтрон состоит из протона и нейтрона и является одним из простейших ядер, содержащих более чем одну частицу.

Химические и физические свойства лёгкого и тяжёлого изотопа водорода оказались во многом различными, в этой связи тяжёлому изотопу водорода было дано «персональное имя» – **дейтерий** (Deuterium) и его принято рассматривать как самостоятельный химический элемент.

В частности, дейтерий может входить в состав сложных молекул, например воды H_2O . Новые образования на основе дейтерия HDO , D_2O обладают различными молекулярными массами.

Точная масса атома дейтерия равна 2,0147 а.е.м. Свойства тяжелой воды D_2O отличаются от свойств обычной воды H_2O . Точка замерзания тяжелой воды на $3,8^\circ C$, а точка кипения на $1,4^\circ C$ выше, чем у обычной воды. Дейтерий широко используется в атомной энергетике, он является одним из лучших замедлителей нейтронов в атомных реакторах. По замедлительным свойствам дейтерий в 170 раз превосходит обычную воду, в 75 раз бериллий и в 70 раз графит.

Первое проникновение в ядро осуществил в 1919 году Резерфорд, установивший, что ядро можно расщепить, подвергнув его воздействию α – частиц. Впервые это было сделано с ядрами азота (рис. 4.16)

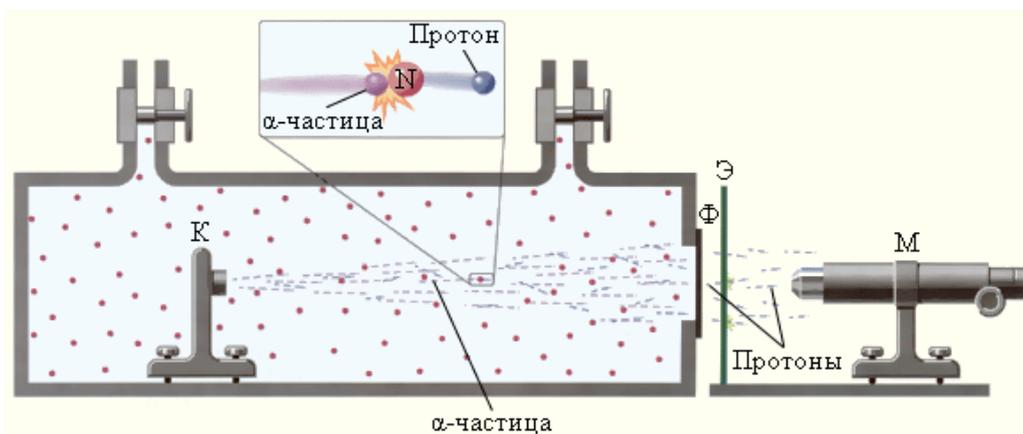
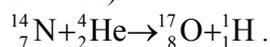


Рис. 4.16. Установка Резерфорда для расщепления ядер азота

Ядра азота бомбардировались α – частицами, излучаемые полонием, расположенным в свинцовом контейнере К, выбиваемые их ядер азота протоны, попадали через фольгу Φ на экран Э, покрытый сернистым цинком и вызывали световые вспышки, наблюдаемые в микроскоп М. В результате бомбардировки α – частицами атом азота ${}^{14}_7N$ превращается в изотоп кислорода с массой 17 а.е.м. Сбылась мечта алхимиков! Теоретически стало возможным одни химические элементы

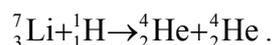
превращать в другие, чего, собственно и добивались некоторые химики средневековья, они свинец и ртуть хотели превратить в золото.

В тридцатых годах нашего столетия ядерная физика не являлась ведущей научной отраслью и выглядела весьма скромно. Но были энтузиасты, видевшие перспективы этого направления исследований (рис. 4.15).

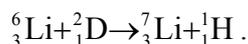
Считалось, в частности, что таблица элементов является вполне законченной, открытым считался лишь вопрос о том, существуют ли элементы более тяжелые, чем уран U_{92}^{238} – самый тяжелый из встречающихся в природе нуклидов. Более или менее романтические ожидания были связаны с возможным продолжением периодической системы с помощью **трансурановых элементов**, которые, как предполагалось, обладают весьма интересными свойствами.

Однако при более пристальном рассмотрении оказывалось, что не следует возлагать на это слишком больших надежд, так как, начиная с порядкового номера $Z = 84$, все нуклиды радиоактивны. Точнее, если ядро состоит из слишком большого числа частиц, оно не может удержать их вместе, и начинается цепь превращений с испусканием частиц; она продолжается до тех пор, пока не достигается граница устойчивости.

В 1932 году было обнаружено, что пучки протонов с энергией 12кэВ расщепляют ядра лития:

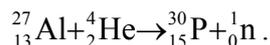


Для бомбардировки ядер использовался изотоп водорода D – дейтерий, и он оказался необычайно эффективным. В частности, оказалось, что с его помощью можно превратить легкий изотоп лития в тяжелый:



В 1934 году Ирен и Фредерик Жолио Кюри открыли новый класс ядерных превращений, которые назвали процессами искусственного получения радиоактивных веществ, или **искусственной радиоактивностью**.

Они обнаружили, что ядра алюминия, подверженные бомбардировке α - частицами, продолжают излучать и после прекращения бомбардировки. При этом, остаточное излучение состояло из положительных электронов:



В результате этой ядерной реакции получался радиоактивный изотоп фосфора, который затем превращался в изотоп кремния, испуская позитрон, т.е. положительный электрон.

Для получения трансурановых элементов Энрико Ферми использовал нейтроны, так как электрически нейтральным частицам «не страшен» потенциал отталкивания ядра.

Нейтроны должны сразу же вступать во взаимодействие с ядрами. Уже в 1938 г. Ферми удалось превратить ядро урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ в ядро с порядковым номером $Z=93$. При этом было установлено, что атомный номер ядра, захватившего нейтрон, изменяется на 2 на 1 или вообще не меняется, что соответствует излучению α – частицы, протона или светового кванта.

Если нейтроны проходят через среду, содержащую много атомов водорода, то в результате столкновений с протонами, которым они отдают в среднем половину своей кинетической энергии, они замедляются, приходя в состояние теплового равновесия с этой средой. При этом ядерные реакции, которые вызывают эти медленные нейтроны, отличаются высокой интенсивностью, что позволяет эффективно исследовать строение ядер.

Опыты Энрико Ферми позволили установить на качественном уровне схему распада материнского ядра. Нейтрон «скрывался» в ядре урана, которое путем α – распада превращалось в нуклид с порядковым номером на единицу большим.

Подобные эксперименты проводил и Жолио-Кюри: он сообщил, что при этом возник некий элемент, который распадался с периодом полураспада 3,5 ч и, без сомнения, являлся трансураном. Этот элемент имел также очень большое химическое сходство с элементом из группы редкоземельных элементов.

Желая уточнить эти не вполне понятные эксперименты, в работу включились немецкие радиохимики Отто Ган, Лиза Мейтнер и Фриц Штрассман. После трудоемких исследований осенью 1938 г. они установили, что был получен не трансурановый элемент, а барий.

17 декабря 1938 г., когда факт получения бария был установлен окончательно, Отто Ган сообщил следующее: «Эти опыты окончательно убедили нас в том, что при облучении урана нейтронами тяжелое ядро урана распадается на осколки, один из которых – барий, представленный различными изотопами. Одновременно с расщеплением урана мы установили также факт расщепления тория; здесь также одним из осколков явился барий. Для начала процесса расщепления тория требовались более высокие энергии нейтронов; тепловые нейтроны оказывались не эффективными».

Несмотря на очевидность самой идеи и простоту установки, исследователи еще не решались полностью признать все колоссальное значение своего открытия. Отто Ган однажды заметил, что они долго остерегались окончательно поверить в результаты, так как, согласно тогдашним представлениям, расщепление ядра урана считалось невозможным.

Физика оказалась совершенно не подготовленной к такому повороту событий. Нейтрон проникает в ядро урана, внутри происходят какие-то процессы, после чего оно разваливается на отдельные фрагменты. Объяснить подобное явление с энергетической точки зрения удалось лишь значительно позже.

Теория расщепления ядра была впервые разработана в 1939 г. Н. Бором и Д. Уилером. Независимо от них и даже несколько раньше эту теорию изложил коллегам Я. И. Френкель. В основу обеих теорий была положена **капельная модель ядра**, о которой подробнее будет сказано позже.

Капельная модель, как и все начальные модели, не в состоянии описать все сложные нюансы процесса деления. Некоторые стороны этого явления не вписываются в капельную теорию, а ряд экспериментальных фактов противоречит параметрам модели. Но, тем не менее, изучение колебаний жидкой капли позволило установить важные закономерности, применимые для ядра.

В обычном своём состоянии ядро урана ^{235}U постоянно выбрасывает α – частицы, т.е. оно радиоактивно, период полного распада составляет, примерно $7,1 \cdot 10^8$ лет (рис. 4.17).

Ядро, подобно большой капле воды, подвержено действию сил поверхностного натяжения. Деформации меньше критических,

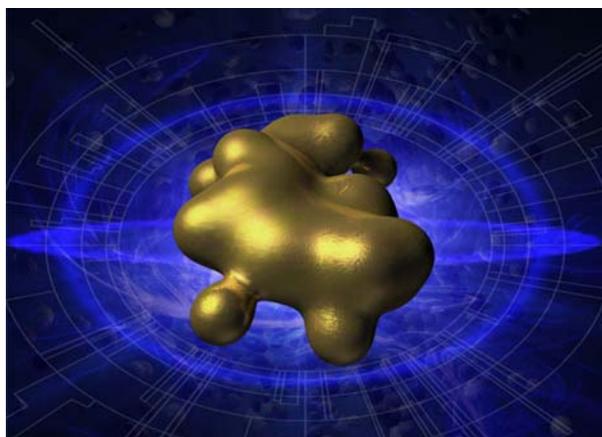


Рис. 4.17. Капиллярные колебания капельной модели атомного ядра

не вызывают распада капли. Вследствие внутренней упругости ядро совершает **капиллярные колебания**. Процесс подобных колебаний формы капель наблюдается при их попадании на горячие поверхности. Под каплями образуется паровая подушка, препятствующая их непосредственному соприкосновению с горячей поверхностью (явление Лейденфроста). Капли на поверхности плиты совершают замысловатый «танец», сохраняя, тем не менее, целостность. В каплях воды могут происходить процессы, не описываемые теорией Лейденфроста.

Вода всегда содержит мельчайшие парогазовые пузырьки, которые при перегреве резко увеличивают свой объём и буквально разносят каплю на куски. Наиболее применима для моделирования ядерных процессов капля воды, взвешенная в масле. При достижении вполне определённой температуры капли, вследствие образования внутри капли конкурирующей фазы, её форма начинает меняться, капля пульсирует принимая форму вытянутого эллипсоида или чечевицы, а затем, как правило распадается на две.

Колебания формы ядерной капли происходят при одновременном проявлении двух типов сил: кулоновских сил отталкивания и ядерных сил притяжения. В обычном состоянии ядра ^{235}U или ^{233}U между этими силами имеет место динамическое равновесие, но ядро находится, как бы, в «перегретом, метастабильном состоянии».

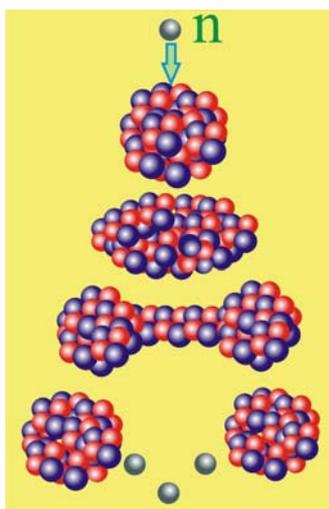


Рис. 4.18 Распад атомного ядра

При попадании в ядро нейтрона (рис. 4.18) высвобождается энергия связи порядка 7,5 МэВ. Этой энергии оказывается вполне достаточно для перевода ядра в возбуждённое состояние.

Ядро начинает совершать очень интенсивные колебания. Если подведенная энергия превышает значение работы деформации, необходимое для преодоления границы устойчивости, ядро распадается на две части: с помощью трековой камеры можно видеть, как они обе разлетаются в диаметрально противоположных направлениях со скоростями, составляющими около $v = 1/20$ скорости света.

Энергию, высвобождающуюся при таком акте деления можно оценить, используя закон Кулона, она составляет примерно 200 МэВ.

Теория утверждает, что методом бомбардировки нейтронами возможно расщепление только относительно крупных и нестабильных ядер U^{233} , U^{235} и Pu^{239} . Энергии таких нейтронов совершенно недостаточно для деления стабильных ядер, например свинца. В природном уране, добываемом на рудниках, преобладает $^{238}_{92}\text{U}$, но расщепляется пополам лишь его изотоп U^{235} , содержание которого не превышает 0,7%.

Факт высвобождения энергии при делении ядра следует так же и из рис.4.14, если двигаться вдоль кривой справа, где должен находиться уран с $A = 235$, примерно до места нахождения продуктов расщепления с $A = 120$, то видно, что энергия связи возрастает от 7,5 МэВ примерно до 8,5 МэВ. Следует иметь в виду, что при делении одного ядра участвует 235 нуклонов, следовательно, избыток, равный 1 МэВ на нуклон, приведет к выделению примерно 200 МэВ в одном акте расщепления.

Чтобы нагляднее представить, значимость этого числа, напомним, что процессы, происходящие в оболочке атома (то есть химические процессы, например обычное горение), сопровождаются выделением энергии в единицы и десятки

электрон-вольт на атом (рис.4.15). Расщепление же ядер урана сопровождается выделением энергии в миллионы раз большей! Например, в 1 кг способного к расщеплению нуклида $^{235}_{92}\text{U}$ содержится $2,56 \cdot 10^{24}$ ядер. Простой расчет при условии расщепления всех ядер дает энергию в $22,8 \cdot 10^6$ Дж.

Как показали проведенные исследования, в результате интенсивных колебаний ядро разрывается, как правило, на две части. Однако новые ядра не обязательно строго равны по массе. Возможно, это чисто случайно, но в большинстве случаев массы осколков относятся как 2:3.

Все «дочерние» ядра радиоактивны, так как по сравнению со своими устойчивыми изотопами они содержат достаточно много нейтронов. Каждое из образовавшихся ядер дает начало новому небольшому радиоактивному ряду распадов, каждый этап которого характеризуется своим периодом полураспада (рис.4.19).

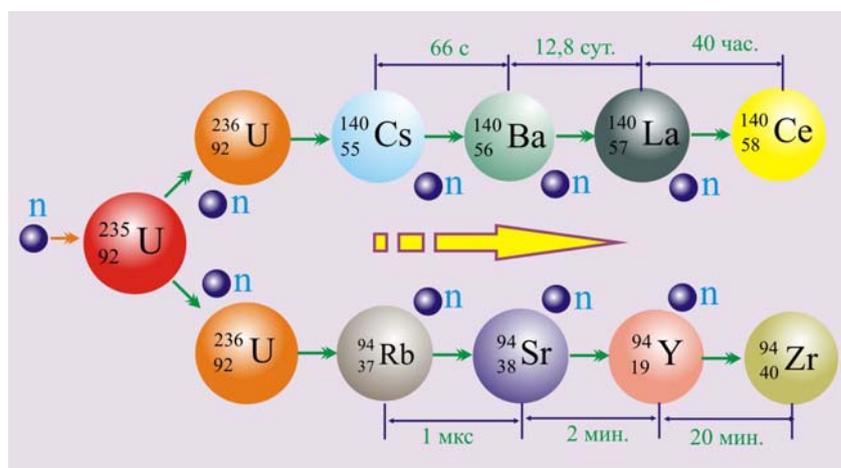


Рис. 4.19. Схема распада ядер урана

Таким образом, ядро урана $^{236}_{92}\text{U}$ превращается в ядро изотопа цезия $^{140}_{55}\text{Cs}$, которое, распадаясь в течение 66 с, становится ядром изотопа бария $^{140}_{56}\text{Ba}$. Этот изотоп тоже радиоактивен, в течение 12,8 дней он становится одним из изотопов лантана $^{140}_{57}\text{La}$, и наконец, спустя ещё 40 часов превращается в церий $^{140}_{58}\text{Ce}$.

Кроме рассмотренной последовательности распада может наблюдаться схема показанная на рис 4.19 (нижняя последовательность). Ядро $^{236}_{92}\text{U}$ распадается на ядро изотопа рубидия $^{94}_{37}\text{Rb}$, которое, живёт несколько микросекунд, становясь изотопом стронция $^{94}_{38}\text{Sr}$.

Стронций, будучи радиоактивным, всего за 2 минуты превращается в изотоп йода $^{94}_{53}\text{I}$ и ещё за 20 минут изотоп йода становится цирконием $^{94}_{40}\text{Zr}$. При каждом акте деления высвобождаются 2 – 3 нейтрона, вылетающие с большой скоростью, так называемые, быстрые нейтроны.

Как видно, новые образования при ядерном делении получают в возбужденном состоянии, и их внутренняя энергия высвобождается в первую очередь путем испарения нейтронов и в виде γ – излучения.

Основными продуктами процесса деления являются, таким образом, два примерно равных ядра, несколько нейтронов и γ – квантов.

5. Энергия атома

5.1. Научная и экономическая целесообразность

Прежде чем начать рассмотрение особенностей получения атомной и ядерной энергии в мирных и военных целях, необходимо несколько слов сказать о состоянии и перспективах энергетики вообще и её роли в развитии современной цивилизации в частности. Начать необходимо, на наш взгляд, с напоминания о том, что человек является единственным живым организмом на планете, который способен осваивать новые источники энергии и преобразовывать получаемые энергетические потоки по своему усмотрению. Временную последовательность освоения человечеством различных энергетических источников можно представить в следующей последовательности:



Рис. 5.1. Первая в мире атомная электростанция

- Солнце и открытый огонь;
- Мускульная сила;
- Энергия ветра и воды;
- Энергия пара;
- Электрическая энергия;
- Атомная энергия;
- Ядерная энергия.

Первое мирное использование энергии атома началось в СССР. В июне месяце 1954 г была запущена в **Обнинске** атомная электростанция (рис. 5.1). По современным меркам мощность первого атомного энергоблока была более чем скромной, всего 5 МВт электрической мощности. Она уступала по



Рис. 5.2 Курчатов И.В.

эффективности тепловым и гидроэнергетическим блокам, но, не следует забывать, что эта АЭС была первой экспериментальной установкой, позволившей накапливать практический опыт мирного использования атомной энергии. Обнинский эксперимент продемонстрировал практическую возможность использования энергии, заключённой внутри атома. Позже атомные энергоблоки были запущены в Великобритании и США, английская АЭС «Колдер Холл» мощностью 45 МВт (эл) в 1956 г и американская «Шиппингпорт» мощностью 67 МВт (Эл) в 1957 г.

Проектирование первой АЭС началось во второй половине 40-х годов прошлого века ещё до создания атомной бомбы. В 1948 г. по предложению Игоря Васильевича Курчатова и в со-

ответствии с постановлением партии и правительства начались проектирование станции.

В настоящее время лидерами в производстве атомной электроэнергии являются США (788,6 млрд кВт·час/год) на втором месте Франция (426,8 млрд кВт·час/год), третье место принадлежит Японии (273,8 кВт·ч/год), затем – Германия (158,4 млрд кВт·ч/год) и Россия (154,7 млрд кВт·ч/год). Сегодня в мире действует 441 энергетический атомный реактор, 75 реакторов работают на атомном топливе, производимом в России. На рис. 5.3 показаны страны, владеющие в настоящее атомными энергоблоками.

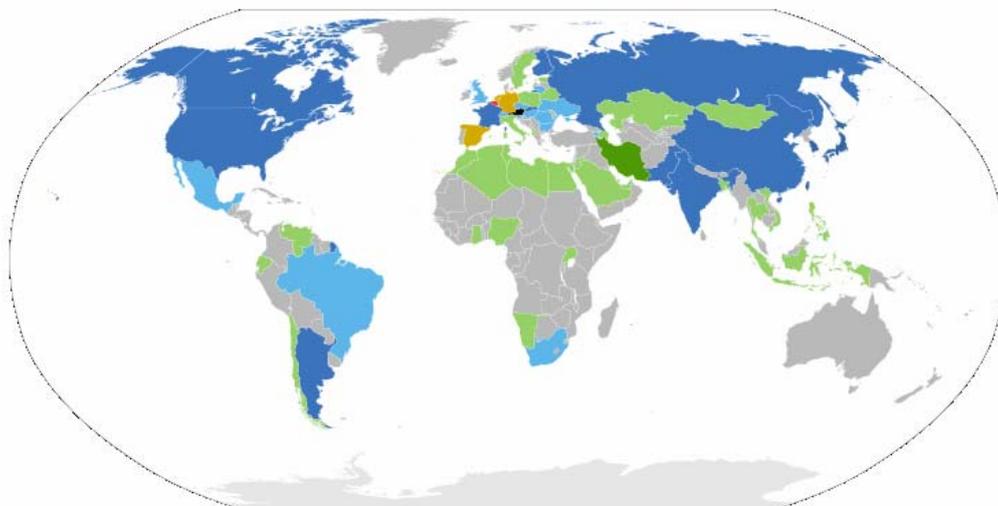


Рис. 5.3. Страны мира с атомной энергетикой

К концу XX в. доля производства электроэнергии на атомных электростанциях в процентах от общего производства по отдельным государствам составляло: Франция – 78%, Бельгия – 60%, Швеция – 43%, Испания – 36%, Ю. Корея – 36%, Украина – 33%, Германия – 29%, Япония 28%, Великобритания – 28%, США – 19%, Канада – 18%, Россия – 12%, все страны мира – около 18%.

Следует отметить, что до распада СССР атомная энергетика у нас в стране развивалась впечатляющими темпами. Это объяснялось несколькими причинами.

Во-первых, в стране был накоплен огромный опыт в разработке, конструировании и строительстве атомных энергоблоков, мы занимали в мире лидирующие позиции.

Во-вторых, около 80 % сырьевого потенциала сосредоточено в северо-восточных районах страны, а 75% потребления электроэнергии приходится на нашу европейскую часть.

В-третьих, 40% всех грузоперевозок приходится на перевозки органического топлива из восточных регионов на Урал. В условиях большой протяжённости железнодорожных маршрутов калорийность топлива приобретает не маловажное значение. Атомное энергопроизводство, практически, не привязано к месту добычи и переработки.

В последние десятилетия прошлого века атомные энергоблоки начали использоваться как для производства электроэнергии, так и для снабжения промышленных и жилых комплексов теплом. Положение в современной атомной энергетике не однозначно.

После катастрофы на Чернобыльской АЭС и в Японии, подпитываемая нефтяными картелями, поднялась целая волна протестов против строительства АЭС, что привело к снижению темпов строительства и даже консервации недостроенных объектов.

Мировая история знавала много подобных зигзагов, достаточно вспомнить антагонизм обывателей к первым паровым самодвижущимся экипажам и обвинения Бенжамена Франклина в общении с дьяволом после изобретения им громоотвода.

Напомним, что церковь обвинила громоотводы в засухе, якобы именно их наличие над крышами домов разгоняло грозовые облака и препятствовало пролитию дождей из облаков. Неприятие технических новинок, которые могли изменить стратегическую расстановку экономических потенциалов на рынке энергии, всегда сопровождалось мощнейшим противодействием тех, кто владел преимуществами и не хотел их терять.

Прошедший XX в. стал знаменит революциями в социальной и научной сферах. Широкое использование технологий и открытий, сделанных в XIX и XX веках создало у наших современников иллюзию неограниченных возможностей научно-технических достижений при создании искусственной среды обитания.

По прогнозам учёных до 2050 г. потребление первичной энергии должно возрасти в 2,5 раза, а электроэнергии в 4,7 раза. Для обеспечения такого неуклонного роста энергопотребления в запасе у цивилизации существует ряд теоретических возможностей:

- **Повышение эффективности использования традиционных углеводородных энергетических носителей;**
- **Увеличение областей применения возобновляемых источников энергии, таких как ветровых, солнечных, геотермальных и биологических;**
- **Интенсификация использования атомной энергии.**

Трудно себе представить, чтобы население экономически развитых стран по своей доброй воле ограничило свои всё растущие энергетические потребности, в этой связи, надежды возлагаются только на способы увеличения количества вырабатываемой энергии.

И вот тут, с учётом сокращающихся запасов углеводородного топлива, атомная энергетика представляется, чуть ли не единственной перспективной на ближайшие 200 лет областью энергетики.

Кроме того, атомные энергоблоки, при соблюдении всех правил их эксплуатации являются, как это ни покажется странным на первый взгляд, экологически более чистым производством по сравнению с тепловыми электростанциями, питающимися углеводородным топливом.

К настоящему времени политические лидеры экономически развитых стран созрели во мнении, что выбросы углекислого газа и других, загрязняющих атмосферу веществ, при увеличении выработки энергии, по крайней мере, не должны увеличиваться.

Один из путей реализации экономических амбиций экономически развитых стран заключается в модернизации существующих АЭС в плане обеспечения их безопасности, включая разработку новых технологий транспортировки и переработки радиоактивных отходов.

В настоящее время энергия, вырабатываемая на АЭС, не может составить значительной конкуренции традиционным источникам, использующим углеводородное топливо. Однако, в связи с растущим дефицитом углеводородов и повышением их стоимости значимость АЭС возрастает.

В настоящее время кроме перечисленных стран АЭС эксплуатируются в Аргентине, Бельгии, Индии, Испании, Италии, Нидерландах, Южной Кореи, Пакистане, Иране, Финляндии, Швейцарии, Тайване, Бразилии, Филиппинах, ЮАР, Бангладеш, Дании, Египте, Иране, Ирландии, Люксембурге, Пуэрто-Рико и Турции.

Опубликованные к настоящему времени прогнозы развития атомной энергетики, несмотря на некоторое снижение темпов строительства, предвещают на ближайшее пятилетие увеличение производства электроэнергии на АЭС в 2 – 2,5 раза.

Отметим, что под термином энергоресурсы понимается совокупность энергосущих не возобновляемых полезных ископаемых (уголь, природный газ, нефть, торф, сланцы, уран, торий) и возобновляемых энергетических компонент (солнце, ветер, геотермальные и гидротехнические).

На рис. 5.4 показана динамика использования различных источников энергии, выраженная в относительных долях $[F/(1-F)]$, по горизонтальной оси отложены годы.

Источники тепловой энергии как бы конкурируют во времени между собой. Безразмерная величина F представляет собой долю данного топлива в производстве различных видов энергии с 1800 по 2100 гг.

По расположению этих, во многом условных качественных зависимостей, тем не менее можно проследить историю развития энергетических технологий в течение двухсотлетнего периода так называемой технологической революции. В ранние периоды революции доминировало в качестве источника энергии дерево.

У дерева удельная теплота сгорания равна $1,0-1,2 \cdot 10^7$ Дж/кг, что более чем в четыре раза меньше, чем у современных жидких топлив, таких как бензин и дизельное топливо. А у природного газа величина q почти в пять раз больше.

На графиках рис. 5.4 видно, как по очереди лидировали такие виды топлива, как дерево, уголь, нефть и газ, как происходила во времени замена одного вида топлива другим.

На очереди ядерное топливо, у которого $q \cong 7,4 \cdot 10^{13}$ Дж/кг, что в миллион раз превосходит удельную теплоту сгорания традиционных твердых, жидких и газообразных топлив.

Эта замена сопровождалась и одновременным увеличением коэффициента полезного действия устройств, применяющихся для получения энергии. Достаточно обратиться к данным табл. 5.1, чтобы убедиться в этой закономерности.

Это эволюция энергоносителей. Особое место занимает водород. Удельная теплота сгорания водорода $q \cong 1,42 \cdot 10^8$ Дж/кг, что примерно в четыре раза выше, чем у жидких сортов топлива. Однако водород в свободном состоянии в природе отсутствует. Водород получают при диссоциации молекул воды. В настоящее время эти

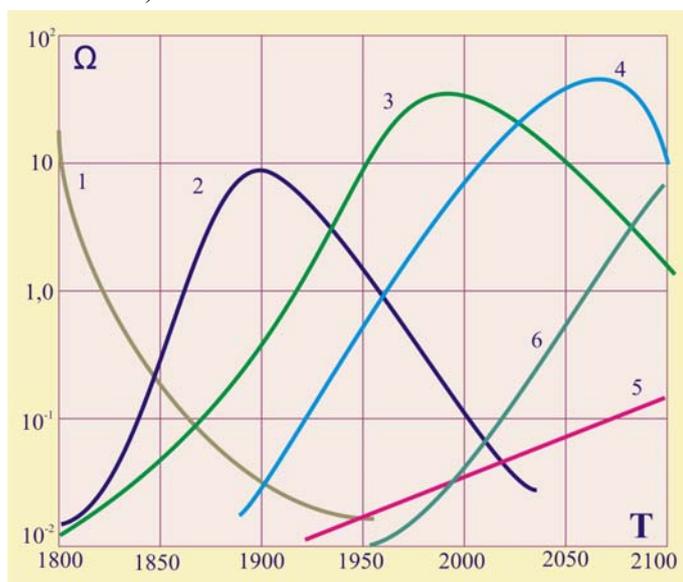


Рис. 5.4. Динамика использования различных сортов топлива. 1 – дерево, 2 – уголь, 3 – нефть, 4 – газ, 5 – солнечная и ветровая энергия, 6 – атомное топливо.

двухсотлетнего периода так называемой технологической революции. В ранние периоды революции доминировало в качестве источника энергии дерево.

технологии достаточно экономически затратные, поэтому не идут дальше лабораторных и опытных образцов.

Таблица 5.1

<i>Топливо</i>	<i>q, кДж/кг</i>	<i>Топливо</i>	<i>q, кДж/кг</i>
Условное топливо	29308	Дрова (влажн. 30%)	12300
Твердое топливо		Дрова (влажн. 40%)	10200
Антрацит	29100	Алюминий	3100
Антрацит донецкий	26800	Бериллий	66600
Бурый уголь канско-качинский	15700	Литий	43100
Бурый уголь подмосковный	10500	Магний	24830
Бурый уголь челябинский	14650	Порох пироксилиновый	3780
Каменный уголь	25525	Порох дымный	5020
Сланцы горючие	11215	Топливо самолетов	43100
Солома	14300	Газообразное топливо	
Твердое ракетное топливо	10500	Ацетилен	49900
Торф в брикетах	15100	Водород	142868
Тротил	15100	Доменный газ	3100
Атомное горючее	$7,4 \cdot 10^{13}$	Коксовый газ	8080
Жидкое топливо		Метан	49800
Бензин авиационный	44400	Оксид углерода (II)	42300
Бензин автомобильный	44000	Природный газ	49000
Дизельное топливо	42700	Пропан	46400
Ракетное топливо	9600	Сероводород	15600
Керосин осветительный	43100	Этан	47500
Мазут	39800	Этилен	47300
Спирт этиловый	26000		

Основным энергоносителем первой половины XXI века, как следует из обсуждаемых прогнозов, будет природный газ, удельная теплота сгорания которого $q \approx 5 \cdot 10^7$ Дж/кг. Это, конечно, меньше, чем у водорода, но водород необходимо получать, а газ дарит природа.

Использование в качестве топлива природного газа дает возможность достигать достаточно высокой энергетической и экономической эффективности энергетических установок. Среди всех ископаемых углеводородных видов топлива природный газ является несомненным лидером по экологическим показателям.

Вместе с тем при его сгорании образуется окись углерода CO_2 , которая выбрасывается в атмосферу. Кроме того, в процессе добычи и транспортировке газа имеются потери метана.

Принято считать, что развитие газового комплекса на какое-то время способно обеспечить не только энергетические потребности, но решить целый ряд экономических проблем, в частности финансирование наукоемких промышленных технологий и социальной сферы.

В настоящее время отсутствуют принципиальные трудности использования

сжиженного газа в качестве топлива двигателей внутреннего сгорания на автомобильном, железнодорожном, авиационном и морском транспорте.

Для нашей страны это весьма благоприятный прогноз, если учесть, что запасы природного газа на территории России составляют 33% от разведанных запасов и больше 40% от прогнозируемых ресурсов Земли. Природный газ является для нас не просто эффективным энергоресурсом, а одним из главных средств решения целого ряда социальных и экономических задач.

Экспортные поставки природного газа обеспечивают стабильные валютные поступления в бюджет, которые могут заложить основу перспективного благополучия. По мнению оптимистически настроенных экспертов (кстати, не только отечественных) начало наступившего века и его середина будет характеризоваться устойчивым наращиванием в России добычи природного газа.

Прагматичные же специалисты считают, что газовое «эльдорадо», как и все в этом мире, имеет начало и конец. **Около 2050 – 2060 г. газовая компонента в энергообеспечении потребностей человека достигнет своего максимума, за которым последует неминуемый спад.**

Этот спад объективен по нескольким причинам. Прежде всего, будут истощаться многие ныне эксплуатируемые месторождения, расположенные сравнительно близко к основным промышленным потребителям.

Новые месторождения будут находиться, по всей вероятности, на севере и востоке России, а также на шельфах северных морей. В частности, шельф Охотского моря, по мнению гидрогеологов, имеет промышленно значимые залежи газа.

Чтобы обеспечить гарантированно надежную транспортировку и переработку газа потребуются дополнительные капиталовложения, что сделает этот вид топлива экономически менее привлекательным.

Кроме того, есть надежда, хотя и не очень вероятная, что не только ученые, но и политики и государственные чиновники вспомнят, что газ помимо способности гореть является уникальным химическим сырьем, которое все-таки необходимо расходовать экономно, чтобы потомки окончательно не прокляли наше необдуманно нерациональное время.

Как видно из приведенных на рис. 5.4 данных, объединивших исследования многих ученых, в частности японских и немецких, в обозримом будущем наиболее перспективными, какие бы субъективные и объективные причины не выдвигались, будут являться две технологии производства энергии – атомные, ядерные и солнечные.

По мнению ученых, именно на освоение этих видов энергии должны быть направлены основные усилия современной цивилизации, если она имеет цель сохранить себя. Определенным подспорьем, конечно, явятся возобновляемые источники энергии, которые нам подарила природа.

Но вначале, как это принято у людей, **повоюем за остатки ископаемых ресурсов**, причем, чем дальше, тем интенсивнее. Ситуация в Ираке, Ливии, египте судя по всему и к великому сожалению, – это только начало череды энергетических войн.

Развитие атомной энергетики на начальном этапе, казалось, не подчинялось существовавшим закономерностям конкурентной смены технологий производства энергии (рис. 5.4).

Поначалу наращивание ядерных мощностей демонстрировало значительно более высокие темпы роста, чем следовало из общих теоретических предпосылок. Сегодня мы наблюдаем, вопреки прогнозам, снижение темпов развития атомной энергетики, и перспективы на ближайшее время отнюдь не оптимистичны.

По мнению специалистов МАГАТЭ, в предстоящие 20 лет произойдет еще

большее отклонение закономерностей развития атомных мощностей от общих тенденций. Причем в экономически развитых странах Европы и Северной Америки будет наблюдаться более чем умеренный рост атомных мощностей и относительно бурное развитие атомной энергетики в странах азиатского региона.

Одно из возможных объяснений такого положения вещей состоит в том, что на начальном этапе атомная энергетика развивалась параллельно с военными технологиями, что обеспечивало высокий уровень государственных инвестиций как в научно-технические разработки, так и в промышленное строительство.

Атомные комплексы СССР и США (включая военные технологии) находились в условиях жесткой конкуренции, результаты которой определяли ядерный паритет.

В настоящее время государственное финансирование мирной атомной промышленности, как, впрочем, и военной, в нашей стране реализуется в лучшем случае в форме коммерческого соревнования.

Прогноз атомной энергетической компоненты в России в условиях современной экономики, ориентированной в основном на экспорт углеводородов, представляется не вполне определенным.

Диапазон вариантов оценки экспертами масштабов развития ядерной энергетики России достаточно широк: от застоя на существующем уровне до удвоения мощностей к 2015 году, хотя маловероятно. Мировой экономический кризис всё-таки!

Подходит время вывода из эксплуатации энергоблоков, отслуживших свой срок, и строительства реакторов нового поколения. Многие эксперты сходятся во мнении, что перспективы мирного атома напрямую связаны с мировыми ценами на нефть. При достаточно высоких расценках на «черное золото» проблематично, что руководство России озаботится грядущими энергетическими потрясениями и, страхуясь от грядущих неприятностей, станет всерьез стимулировать научно-технические и технологические разработки в области атомных и ядерных исследований, хотя на этот счет имеются публичные заявления должностных лиц высокого государственного ранга.

Вместе с тем в настоящее время отечественной наукой накоплен достаточный потенциал для того, чтобы сделать отечественные атомные технологии на достаточно длительный промежуток времени ведущими в производстве энергии, причем не только у нас в России.

Принципиальные экономические и экологические преимущества ядерной энергии: неограниченные в достаточно длительной перспективе ресурсы топлива, компактная форма ядерных отходов и отсутствие выбросов продуктов сгорания – способствуют ее долговременной конкурентоспособности с другими источниками энергии.

Следует отметить, что радиоактивность сопровождает человека с момента его появления и до самой смерти. Радиоактивные элементы естественного происхождения присутствуют на Земле в достаточно большом количестве. Все дело в концентрации радиоактивных веществ. До эпохи «мирного» атома, т. е. до конца XIX в. никому в голову не приходило, что надо специально контролировать уровень радиоактивности пространства, в котором живут люди.

В настоящее время ситуация поменялась коренным образом. Дело в том, что за короткий промежуток времени человеком было выброшено в окружающую природу большое количество искусственных радионуклидов, синтезируемых главным образом на предприятиях оборонной промышленности и атомной энергетики как побочные продукты, сопровождающие атомные технологии. **Радионуклиды пред-**

ставляют собой нестабильные разновидности ядер атомов, характеризующихся определенным числом протонов (зарядовым числом Z) и нуклонов (массовым числом A).

Попадая в окружающую среду, радионуклиды оказывают воздействия на живые организмы. В этом заключается их опасность. Для правильной оценки этой опасности необходимо четкое представление о масштабах загрязнения окружающей среды, о выгодах, которые приносят производства, основным или побочным продуктом которых являются радионуклиды, и потерях, связанных с отказом от этих производств, о реальных механизмах действия радиации, последствиях и существующих мерах защиты.

В массовом сознании населения доминирует во многом обоснованное настроенное отношение к производствам, деятельность которых приводит к образованию радиоактивных изотопов, и в первую очередь к предприятиям ядерного цикла. Этому способствуют как объективные (крупные аварии), так и субъективные (некомпетентность, искаженная картина, представленная средствами массовой информации) факторы. При этом под влиянием некоторых СМИ рядовыми обывателями не принимаются во внимание два важных обстоятельства.

Во-первых, это необходимость комплексного анализа энергетической ситуации в регионе, стране и на планете в целом, другими словами – сравнительного подхода к оценке перспектив. Хотя есть примеры, вполне доступные для оценок самым рядовым обывателем. Вред, наносимый окружающей среде и человеку, очевиден.

Во-вторых, количество смертей, происходящих на всех дорогах мира в год в автомобильных катастрофах, в настоящее время не на много уступает их количеству в результате цунами и землетрясений.

Казалось бы, что такие «услуги цивилизации» человек должен, по крайней мере, стремиться сокращать. Но такого не происходит, а даже совсем наоборот. А все потому, на наш взгляд, что индивидуальные интересы до настоящего времени преобладают над интересами общества. Мало кто из рядовых граждан озабочен взглядом в не совсем отдаленную энергетическую перспективу.

В-третьих, это экономическая и технологическая необходимость использования атомной энергии в современном мире. Привлекательность использования АЭС связана с ограниченностью и постоянным ростом стоимости энергоносителей для тепловых электростанций, меньшими радиоактивными и значительно более низкими химическими загрязнениями окружающей среды, гораздо меньшими объемами транспортных перевозок предприятий ядерного цикла, отнесенными к единице производимой в конечном счете электроэнергии по сравнению с аналогичными показателями для предприятий топливного цикла.

Альтернативы использованию АЭС в глобальной экономике в настоящее время нет, а в обозримом будущем она может появиться только со стороны термоядерных установок, или, что мало вероятно, человечество согласится потреблять энергии меньше.

В этой связи уместно упомянуть статью Брайна Эппльярда из газеты «The Times» за 21 октября 2004 г. под весьма символическим названием: «Пока еще яркое свет ...».

Эппльярд считает, что «**величайший праздник потребления**» для человечества подходит к концу. Эра более чем двухсотлетнего экономического благополучия населения развитых стран подходит к своему логическому завершению.

«За прошедшие 200 лет жители экономически развитых стран (Европы и Северной Америки) стали меньше болеть, дольше жить, обладая при этом беспрецедент-

ным в истории цивилизации благосостоянием.

Представители пресловутого «золотого миллиарда» могут быть уверены, что проживут они на 25 лет больше, чем их предки времен викторианской эпохи, на 45 лет больше, чем предки времен Средневековья и на 55 лет больше, чем люди из каменного века. Такова статистика.

Уровню жизни рядового американца или европейца позавидовал бы император Нерон. И когда заканчивается земной путь граждан экономически развитых стран, то уходят они с верой в то, что их дети и внуки будут жить еще лучше.

Они уверены, что автомобили станут еще комфортабельнее, самолеты будут летать быстрее, сжигая в атмосфере миллиарды тонн кислорода, а бытовая техника станет доступнее и умнее, даже рак и СПИД будут побеждены».

С Эппльярдом солидарен Генри Портер, обозреватель английской газеты «The Guardian», который считает, что «большая энергетическая игра» XXI века уже началась. Портер в своей аналитической статье «Атомная энергетика? Не спешите ее хоронить», опубликованной 28 ноября 2005 г., заостряет внимание читателей на очевидном обстоятельстве: «...Мы настолько привыкли, что получим энергии, сколько понадобится, что практически не понимаем, как много этой самой энергии нам нужно, не снисходим до того, чтобы подумать о реальности окружающего мира, ни такого, какой он есть, ни – и это еще более серьезно – такого, каким он будет».

Далее Портер в качестве подтверждения своей гипотезы о начале «большой энергетической игры человечества» приводит ситуацию в Ираке, которая сложилась не из-за угрозы химического оружия и деятельности «Аль-Каиды», а исключительно вследствие нефтяных притязаний американцев.

Становится, по мнению Портера, ясным, зачем необходимо было официальной пропагандистской машине США возбуждать в воображении обывателя страх перед терроризмом в таких масштабах.

А только для того, чтобы война на другом конце света стала для американского обывателя естественной необходимостью, чтобы развязать на самом деле энергетическую войну.

Антитеррористическая пропаганда позволяет держать сознание граждан в постоянном напряжении, что дает возможность более жестко контролировать общественность, настраивая ее на необходимость военных конфликтов.

Портер считает, и с ним солидарны многие, что вместо нагнетания антитеррористической истерии необходимо заняться ликбезом среди либерально настроенной и наивной общественности, которая продолжает верить в мифы об опасностях атомной энергетики и в сказки о скорой замене нефтяных технологий на альтернативные из числа возобновляемых источников энергии.

При этом эта самая общественность катается на джипах, которые потребляют в четыре раза больше углеводородного топлива, чем обычный автомобиль, и живут в домах, энергетика которых подобна черной дыре.

В неизбежности развития атомной энергетики уверены и отечественные крупные ученые и специалисты. Академик РАН, депутат Государственной думы РФ Роберт Искандерович Нигматулин в своей работе «Атомная энергетика – перспективная отрасль» на основе своей многолетней профессиональной деятельности утверждает, что в атомной энергетике экономика и экология идут рука об руку.

Р.А. Нигматулин обращает внимание читателей на тот факт, что в России разрушительные тенденции всегда были окрашены в основные цвета спектра. Были красные и белые, теперь появились зеленые.

Так называемые «политические экологи» под зелеными знаменами борьбы за

экологическую чистоту окружающего пространства направили вектор своих усилий на борьбу с производительными силами.

Выступая с высоты самых громких в стране трибун, они генерируют в обществе идеи неприятия планов развития атомной энергетики, хотя известно, что внедрение экологических мероприятий, которые стоят немалых денег, возможно только при условии развитой и энергетически эффективной экономики.

Если по призыву «политических экологов» закрыть химические комбинаты, атомные станции, машиностроительные заводы, металлургические комбинаты, то ситуация с экологией не станет лучше. Опыт говорит об обратном.

Экология требует вложения средств и немалых энергетических затрат. Подрывая энергетическую базу, люди должны понимать, что пилят не очень толстый сук, на котором сидят. Россия пережила этап «резкого улучшения экологической обстановки» 80-х годов прошлого века. Но какой ценой? Все мы, живущие ныне, тому свидетели. Было дело, в иных городах и весях денег не было даже на вывоз мусора, не говоря уже об обеспечении приемлемого уровня жизни.

Экономика должна удовлетворять не только нужды человека, но и компенсировать издержки его производственной деятельности.

Академик Р.А. Нигматулин напоминает, что реку Рейн удалось сделать экологически чистой только после того, как энергетический потенциал Западной Европы, не сопоставимый с ее потенциалом 50-х годов XX века, смог себе это позволить.

Не секрет, что самым важным показателем экономических и экологических показателей страны является уровень развития её энергетики. Это особенно актуально для России, большая часть которой располагается в холодных регионах, где тепловая и электрическая энергия необходимы для выживания человека так же, как воздух и пища.

Естественно, что атомная энергетика не является экологически безупречной и уступает по безопасности возобновляемым источникам. Но энергия нужна человечеству уже сейчас и в больших количествах, а альтернативные источники, несмотря на их огромный потенциал и экологическую привлекательность, в ближайшее время не смогут быть использованными в требуемых объемах по многим объективным и субъективным причинам.

Говоря о радиационной опасности атомной энергетики, следует обратить внимание на то, что доля радиации, связанной с развитием атомной энергетики, незначительна по сравнению с радиацией, обусловленной деятельностью человека.

Несоизмеримо большие дозы радиационного загрязнения вызваны иными источниками, никак не связанными с энергетикой, но вызывающими, как это ни покажется странным, меньше нареканий.

Применение рентгеновских лучей в медицине, сжигание огромного количества угля, использование воздушного транспорта, пребывание длительное время в хорошо герметизированных помещениях могут привести к значительному увеличению уровня облучения.

Атомная энергетика сопряжена с целым рядом технологических процессов. Это добыча урановой руды, создание ядерного горючего, его хранение и транспортировка, использование на АЭС и хранение радиоактивных отходов и их переработка.

Отходы ядерных технологий представляют собой мощный энергетический ресурс. Утилизация отходов может быть осуществлена на АЭС. В настоящее время, по мнению экспертов, на территории России накопилось около 700 млн. м³ радиоактивных отходов. В основном радиоактивные материалы возникли при реализа-

ции военных программ.

Львиную долю радиоактивных веществ люди получили как непереносимое приращение к атомному и ядерному оружию и атомных силовых установок надводных и подводных судов.

Современной отечественной наукой разработаны вполне надежные и экологически безопасные технологии использования радиоактивных отходов военно-промышленного комплекса в атомной энергетике.

Современные АЭС в качестве топлива в основном используют энергетические возможности урана U^{235} . Новое поколение реакторов, например БН-600, работающих на уране U^{238} , позволяет из урана вырабатывать энергетический плутоний.

В настоящее время Россия является мировым лидером в разработке мирных атомных и ядерных технологий, это касается и средств переработки радиоактивных отходов. Переработка отходов атомной энергетики является проблемой для многих стран.

На имеющихся в России технологиях можно зарабатывать деньги, пока до нашего уровня не подтянулись другие страны атомного клуба. Если в Россию за 20 лет ввезти и переработать 20 000 т радиоактивных отходов, то чистая прибыль составит около 20 млрд. долларов.

Эти средства необходимо израсходовать на дальнейшее развитие атомного энергетического комплекса и финансирование фундаментальных исследований в области энергетики, включая разработку технологий использования возобновляемых источников энергии.

Случилось так, что СССР, с его жесткой, а временами и жестокой системой централизованного управления, на определенном этапе атомной гонки стал абсолютным лидером, генератором новых идей и технологий. Причин тому несколько. О военных и политических обстоятельствах будет сказано позже.

Одной из главных причин послевоенных успехов отечественных ученых и инженеров стала **система образования**. Сразу после Великой Отечественной войны в нашей стране была реанимирована эффективная система образования – от школьного до вузовского. **Ориентированная на освоение существующих и разработку перспективных технологий, система советского образования на основе уникальных и высококачественных фундаментальных знаний обеспечила стране научно-технический прорыв.**

Большая часть современной энергетической базы России расположена в восточной части страны – это уголь, горючие сланцы, нефть, газ, а основная масса населения проживает в европейской части страны. В западных регионах доля электроэнергии, производимой АЭС, составляет не более 30%. Если говорить о развитии промышленности в этих густонаселенных районах, то без энергии мирного атома в перспективе попросту не обойтись.

Между тем, несмотря на практически полное отсутствие государственной поддержки, Минатомом России за последние три года увеличено производство электроэнергии на 25% и в 4 раза – инвестиций в науку. Производство электроэнергии достигло уровня 1990 г., что само по себе представляется своеобразным экономическим феноменом современной России.

В настоящее время почти все экономически развитые страны имеют в своих энергосистемах атомную компоненту производства электроэнергии. В табл. 5.2 приведены данные МАГАТЭ по производству электроэнергии на конец XX в., получаемой путем расщепления радиоактивных веществ. В настоящее время в эксплуатации находится более 400 атомных станций.

Таблица 5.2.

Данные о работающих и строящихся АЭС в конце XX в.					
Страна	Эксплуатируется		Строится		Доля АЭС в выработке энергии, %
	Кол-во блоков АЭС	Мощность, МВт	Кол-во блоков АЭС	Мощность, МВт	
Аргентина	2	935	1	692	13.8
Бельгия	7	5527	-	-	55.8
Болгария	6	3538	-	-	45.6
Бразилия	1	626	1	1245	0.01
Великобритания	34	11720	1	1188	25.8
Венгрия	4	1729	-	-	43.7
Германия	21	22657	.	-	29.3
Индия	9	1493	5	1010	1.4
Иран	-	-	2	2146	-
Испания	9	7105	-	-	35.0
Казахстан	1	70	-	-	0.6
Канада	22	15755	-	-	19.1
Китай	8	2100	-	-	1.5
Корея Южная	10	8170	-	-	35.5
Литва	2	2370	-	-	76.4
Мексика	2	1308	-	-	3.2
Нидерланды	2	504	.	.	4.9
Пакистан	1	125	1	300	1.0
Россия	29	19843	4	3375	11.4
Румыния	-	-	5	3250	-
Словакия	4	1632	4	1552	49.0
Словения	1	632	-	-	38.0
США	109	98784	1	1165	22.0
Тайвань	6	4980	-	-	31.7
Украина	15	12679	6	5700	34.2
Финляндия	4	2310	-	-	29.5
Франция	56	58493	4	5810	75.3
Чехия	4	1648	2	1824	28.2
Швейцария	5	2985	-	-	36.8
Швеция	12	10002	-	-	51.1
Южная Африка	2	1842	-	-	5.7
Япония	49	38875	5	4799	30.7

Их совокупная мощность достигает примерно $3,5 \cdot 10^{11}$ Вт, что составляет около 18% от общего количества электроэнергии, используемой на Земле (около $2 \cdot 10^{12}$ Вт). По мнению специалистов по глобальной энергетике, количество энергии, вырабатываемой на АЭС, неоправданно мало по сравнению с потенциальными возможностями атомных технологий. Причин, по которым сложилась такая ситуация, несколько, и экологическая среди них занимает не преобладающее место.

Кстати, чтобы получить примерно $3,5 \cdot 10^{11}$ Вт электроэнергии, на станциях, работающих на угле, необходимо сжечь около $1 \cdot 10^9$ т топлива, «позаимствовать» в

атмосфере Земли $2,6 \cdot 10^9$ т кислорода и «подарить» околоземному пространству $3,6 \cdot 10^9$ т углекислого газа. Такая статистика, к сожалению, не является весомым аргументом для стратегов государственных уровней в вопросах экономической и экологической эффективности тепловых станций, работающих на угле. А по поводу нефти еще раз напомним мнение Д.И. Менделеева, который, будучи гениальным химиком, экономически образованным человеком и знатоком нефтяных технологий, был убежден, что в топках котлов выгоднее сжигать денежные знаки среднего достоинства, чем нефть.

На рис. 5.5 приведены данные о мощностях электроэнергетики 12 ведущих стран, нормированные относительно России, вырабатывающей на атомных станциях 19843 МВт электроэнергии.

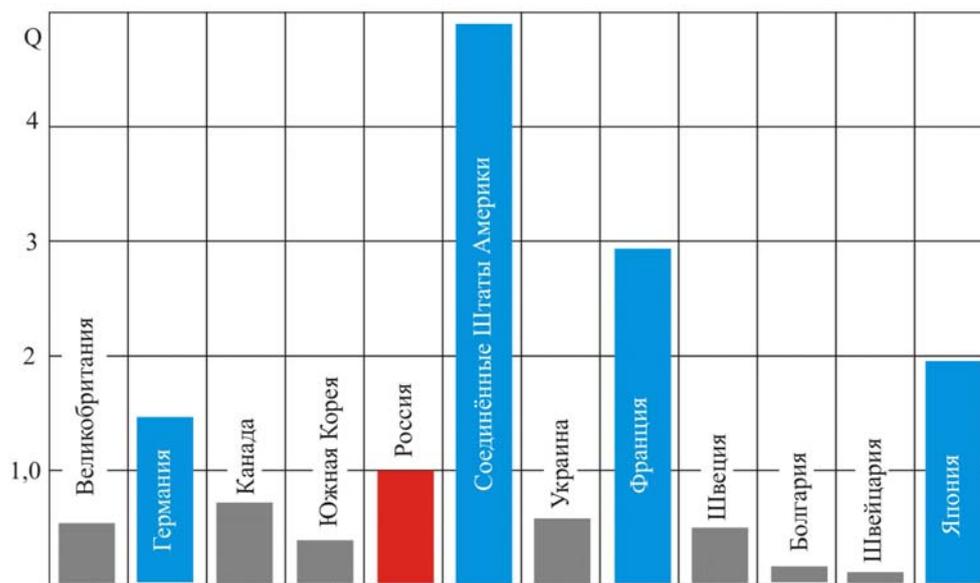


Рис. 5.5. Мощность атомной электроэнергетики ведущих стран относительно России

Величина Q представляет собой отношение мощности данной страны к мощности всех атомных энергоблоков России ($Q = N_X/N_R$). Как видно, Россия занимает по этому показателю пятое место в мире.

Конечно, когда еще существовал СССР, то ситуация была несколько иной, потому что были энергоблоки на Украине, в Казахстане, Белоруссии, Армении, Литве. Впрочем, и Германия получила энергоблоки советского производства, как и все страны бывшего Варшавского Договора, включая Словакию, Словению, Болгарию, Венгрию и Чехию. Кроме того, были еще Ирак, Иран, Индия, Китай, которые в большей или меньшей степени были вовлечены в атомные интересы СССР.

Вместе с неоспоримыми преимуществами атомная энергетика имеет существенные недостатки, связанные прежде всего с потенциальной аварийной опасностью, последний скорбный пример тому – Фукусима.

При рассмотрении экологической безопасности атомных энергоблоков следует различать два характерных режима их эксплуатации: **штатный и аварийный**.

В штатных режимах, когда параметры работы реакторов контролируются операторами, атомные электростанции оказывают незначительное радиационное и химическое влияние на окружающую среду. В отсутствие аварий атомные энергоблоки вносят незначительный вклад в общий радиоактивный фон, сопровождаю-

щей жизнь человека. Вместе с тем атомная энергетическая эра приготовила для человечества новые экологические опасности. При попытке расщепления атомных ядер ученые столкнулись с особым искусственно вызванным видом излучения – радиацией.

Жизнь на Земле возникла и протекала во все времена при естественном радиоактивном фоне и при постоянном воздействии космического излучения. Радиоактивные химические элементы встречаются в природе в малых концентрациях, а при получении чистых веществ, например радия, опасность этого вещества для человеческого организма многократно увеличивается.

Пионеры атомной эры, прежде всего ученые, первыми из людей столкнулись с новой, не ощутимой органами чувств опасностью. Мария Склодовская-Кюри и ее дочь И. Жолио-Кюри умерли от лейкемии вследствие радиационного облучения.

Один из отцов американской атомной бомбы, физик-теоретик итальянского происхождения Энрико Ферми при испытаниях первого атомного заряда весьма оригинальным способом оценил энергию взрыва.

Он насыпал в открытую, горизонтально расположенную ладонь, мелко изорванную бумагу. Взрывной волной бумагу сдуло с ладони. По расстоянию от ладони до места приземления бумажек Ферми вычислил их начальную скорость и оценил энергию взрыва.

До того как Ферми достигла ударная волна, распространяющаяся в воздухе со скоростью звука ($c_3 \cong 340$ м/с), его накрыла электромагнитная волна γ – диапазона, удаляющаяся от эпицентра со скоростью света ($c_c \cong 3 \cdot 10^8$ м/с).

Такие истории при освоении атомной энергии случались в большом количестве, но немногие из них, по вполне понятным причинам, обнародованы даже по прошествии стольких лет. Можно с уверенностью сказать, что человечество до недавнего времени было не готово противостоять опасности новых открытых им сил природы.

Рассмотрим некоторые особенности прохождения через вещество заряженных частиц, γ – и рентгеновских квантов высоких энергий, превышающих ионизационные потенциалы электронов. С позиций влияния на живые ткани опасность представляют частицы с энергиями порядка от нескольких КэВ до десятков МэВ.

В атомной и ядерной физике при рассмотрении биологического действия радиации принято различать три типа частиц:

- **Легкие заряженные частицы, к которым относятся электроны и позитроны;**
- **Тяжелые заряженные частицы (к ним относят все известные частицы, кроме электронов и позитронов);**
- **γ – кванты и кванты жестких рентгеновских лучей;**
- **нейтроны, которые не взаимодействуют с электронными оболочками атомов, но способны взаимодействовать с ядрами атомов.**

Как отмечено выше, явление радиоактивности было открыто Беккерелем в 1896 г., а уже в течение следующего года Мария Кюри и ее муж и соратник Пьер Кюри в лабораторных условиях на достаточно кустарном оборудовании выделили два неизвестных вещества, которые обладали гораздо большей радиоактивностью, чем природные образцы. Это были полоний и радий. Вскоре путем химических превращений естественных минералов ученым удалось получить и другие радиоактивные вещества.

Все радиоактивные элементы обладали одной удивительной особенностью. На степень их активности не влияли известные исследователям физические и химические воздействия. Они не меняли своих радиоактивных свойств ни при сильных

нагревах, ни при доступных охлаждениях. Бессильны оказались и мощнейшие химические реагенты.

Стало постепенно проясняться, что все применяемые учеными воздействия были способны только поменять структуру электронных оболочек атомов. А поскольку от этого радиоактивные свойства веществ не менялись, значит, причину радиоактивности следовало искать в особенностях строения атомного ядра. **Причиной радиоактивности служила нестабильность их ядер.**

В ходе интенсивных исследований было обнаружено, что внутриядерные силы вызывают нестабильность некоторых изотопов, ядра которых, распадаясь, обуславливают различного рода излучения.

Большое число нестабильных изотопов встречаются в природе, но их концентрация в общей массе вещества мала, поэтому и радиоактивное излучение незначительно.

Так, например, в мраморе и граните, из которого любят ваять памятники и скульптуры, часто присутствуют радиоактивные примеси, поэтому вблизи монументов радиоактивный фон всегда повышен. Уголь тоже радиоактивен: в угольной руде содержатся радиоактивные химические элементы, об этом разговор впереди.

Люди научились обогащать радиоактивное сырьё, получая концентрации, значительно превосходящие встречающиеся в природе. Изотопы, полученные искусственным путем, обладают, соответственно, искусственной радиоактивностью.

Для количественного сравнения запасов энергоресурсов различного типа используется понятие условного топлива. Теплотворная способность этого виртуального вещества принята равной $7 \cdot 10^3$ ккал/кг ≈ 29308 кДж/кг, за крупную единицу условной энергии Q принимается величина энергии высвобождающейся при сжигании 36 млрд. т условного топлива.

Все страны мира в настоящее время потребляют около $0,3 Q$ в год. Приблизжённые подсчёты показывают, что 25% первичной энергии идёт на производство электроэнергии, 25% – на отопление, 25% – на промышленные цели и примерно 25% на транспорт всех видов.

Приведенные данные носят ориентировочный характер, потому что они получены по косвенным оценкам развития промышленности разных стран, в этой связи могут отражать только тенденции.

Как видно из данных, приведенных на рис. 5.4, на протяжении всей истории цивилизации несколько раз сменялась картина топливо – энергетического баланса, в настоящее время начинается очередная качественная и количественная трансформация, характерной особенностью которой является увеличение потребления первичной энергии от возобновляемых источников и источников энергии, организованных на атомной основе.

Кроме того, в прежние времена экологические ограничения были совершенно не актуальными, так, по крайней мере, считалось. Хотя, первые серьёзные антропогенные влияния на экосистемы начались при развитии первой промышленной революции, когда цивилизация начала осваивать энергию пара.

Более чем скромные значения КПД первых тепловых машин делали необходимым сжигать огромные количества топлива, более 90% энергетики которого рассеивалось в атмосферных выбросах виде загрязняющих веществ и тепла.

В это же время происходило интенсивное расширение площади пахотных земель, в основном за счёт сокращения лесных массивов. А что самое главное, при развитии тепловых машин была полная иллюзия бесконечных возможностей человечества в выработке энергии, ограничения отсутствовали.

В настоящее время такие ограничения ресурсного и экологического характера оказывают всё большее давление на развитие топливно – энергетических комплексов, практически, всех стран.

Учёные уже давно заметили, что уровень энергопотребления напрямую определяет величины валовых национальных продуктов.

Как уже отмечалось, в настоящее время наблюдается тенденция к возрастанию неравномерности потребления энергоресурсов: 72% населения земного шара потребляет менее 2 кВт тепловой энергии в год, 22% – от 2 до 7 кВт и только 6% населения имеет возможность использовать от 10 кВт и более.

Население слаборазвитых стран ограничивается потреблением около 0,2 кВт тепловой энергии в год. Другими словами, уровень энергопотребления отличается более чем в 50 раз.

По данным специалистов ООН в настоящее время доля природного газа в мировом энергетическом балансе составляет около 19%, твёрдого топлива – около 30%, жидких углеводородов – 47,2%, прочих ресурсов – 2,5%

К энергетическим проблемам современной цивилизации вплотную примыкают трудности с продовольственным снабжением растущего населения планеты. В 70-х годах прошлого столетия международная общественная организация «Римский клуб» предложила ученым провести футуристические исследования с целью выяснения глобальных перспектив развития земной цивилизации.

Серия хорошо оплаченных работ вылилась в доклады, из которых самое яркое впечатление произвели выводы американских исследователей Форрестера и Медоуза. Ученые, используя конкретный статистический материал и специальные методы обработки, создали ряд математических моделей, продемонстрировавших процесс саморазрушения цивилизации.

Моделирование процессов показывало, что до 2030 г. вероятными являются несколько неблагоприятных сценариев: ядерная катастрофа, загрязнение окружающей среды, развитие энергетических проблем, неконтролируемый рост населения, сопряженный с нехваткой ресурсов, включая продовольствие и пресную воду.

Некоторые прогнозы, очевидно, не сбудутся. Много чего в мире произошло. Официально закончилась холодная война, хотя региональные конфликты продолжают множиться. Развиваются программы помощи слаборазвитым странам, хотя в мире еще много голодных людей, тех, которые живут в условиях, не соответствующих общему уровню развития цивилизации.

При рассмотрении перспектив энергетических потребностей необходимо учесть потребности на опреснение воды. Дело в том, что на нашей планете, по оценкам специалистов, запасено всего $1,4 \cdot 10^9$ км³ воды.

Цифра, прямо скажем, впечатляющая, однако, 97,3% этих объёмов приходится на Мировой океан. Солёная океанская вода, как известно, без предварительного опреснения не пригодна для бытового и для промышленного применения.

Оставшиеся 2,7% пресной воды распределены следующим образом. Ледники планеты содержат 75% всей пресной воды, около 24,5% приходится на подземные воды и только 0,36% всех запасов пресной воды относительно легкодоступны. В этой связи, по прогнозам учёных, дополнительные затраты энергии на производство пресной воды составят 0,3 кВт (тепл.) год/чел.

К концу прошлого века человечество ежегодно добывало около 4 млрд. т нефти и природного газа, более 2 млрд. т угля и 20 млрд. т горных пород промышленного применения.

Ежегодно масса Земли искусственно уменьшается на $2,6 \cdot 10^{11}$ кг при её общей массе $6 \cdot 10^{24}$ кг. Из извлекаемой массы только 3% перерабатывается в полезный потребительский продукт. Остальная масса, получив в процессе переработки вредные физико-химические свойства, снова попадает в землю.

Кроме того, низкий КПД источников энергии, используемых человечеством, приводит к значительным тепловым выбросам в атмосферу. В настоящее время человек вынужден затрачивать дополнительные мощности на обслуживание систем экологической безопасности. Уже в настоящее время это составляет 21,6 кВт (тепл.)-год/чел.

Обозначенные энергетические проблемы человечества могут быть сокращены при развитии атомной и ядерной энергетики. Энергия атома может быть получена в реакциях расщепления ядер радиоактивных веществ и в реакциях синтеза ядер лёгких элементов.

Оба вида реакций являются ядерными, но исторически сложилось, что энергия, высвобождаемая при делении ядер, называется атомной. Своё влияние на терминологию оказали военные приложения, там бомбы начали классифицировать на атомные и на ядерные.

Так и прижилось, несмотря на некоторое несоответствие. Говорят об атомных электростанциях, и в то же время о ядерной энергетике. Было бы наверное правильнее все процессы, связанные с вмешательством в структуру атомных ядер считать всё-таки процессами ядерными, а к атомным процессам отнести всё, что связано с трансформацией электронных оболочек атомов.

С другой стороны такая путаница в терминологии не влияет на суть обсуждаемых вопросов. Никого же не смущает, что в электродинамике говорят об электродвижущей силе, хотя все знают, что никаких сил, в современном понимании в этих уравнениях быть не должно. Традиция.

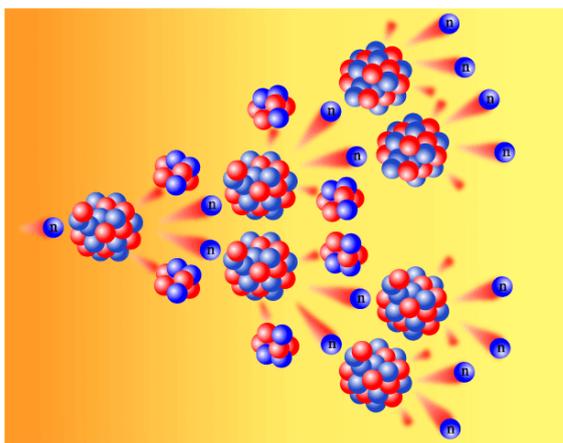


Рис. 5.6. Схема цепной реакции

Контролируемая и самоуправляемая цепная ядерная реакция деления тяжёлых ядер под действием нейтронов лежит в основе работы, практически, всех современных ядерных реакторов (рис. 5.6).

К управляемому делению способны такие нуклиды как: уран U^{233} , уран U^{235} , плутоний P^{239} и плутоний P^{241} . В естественном состоянии, в природной среде, существует только U^{235} , который составляет только 0,7% от всех имеющихся запасов. В природе в основном (99,3%) встречается уран U^{238} , ядра которого не способны к участию в управляемой цепной реакции.

Современные ядерные реакторы в большинстве своём используют для запуска и поддержания цепной реакции тепловые нейтроны, которыми бомбардируют ядра урана U^{235} . Для того чтобы в качестве топлива использовать другие тяжёлые нуклиды $\{U^{233}, P^{239}, P^{241}\}$ необходимо применять реакторы – размножители, в которых при поглощении нейтронов ядрами U^{238} или тория Th^{232} образуется в больших количествах делящийся изотоп плутоний P^{239} или уран U^{233} .

Уран является едва ли не самым распространённым химическим элементом в земной коре (литосфере). Урана в литосфере нашей планеты содержится 1 г на 1 т

почвы. По оценкам геологов только в континентальной зоне планеты содержится ориентировочно 200 млрд. т урана.

Существующие в наше время технологии переработки и обогащения урана, позволяют использовать только около 0,1% массы добываемой руды. Добыча 1 кг U_3O_8 обходится в ценах 2010 г. по 90 долларов за кг. В современных ядерных энергетических устройствах на тепловых нейтронах в качестве топлива используется природный уран ($\approx 99,3\% U^{238} + 0,7\% U^{235}$) или обогащённый уран U^{235} .

Повышение интереса промышленности и бизнеса к урану и ему подобным веществам возникает всякий раз когда на мировом рынке начинаются нефтяные или газовые катаклизмы. В промежутках между топливными кризисами и крупными авариями на АЭС – интерес снижается.

В этой связи и геологические изыскания в странах не имеющей ядерного оружия и энергетики не ведутся, поэтому говорить о достоверности данных по запасам урана можно говорить с оптимистической осторожностью. То, чем располагает сейчас геологическая наука, может рассматриваться как вероятный минимум запасов. Из всех разведанных и подтверждённых запасов урана не более 540% могут уложиться до 150 долларов за 1 кг.

Самые большие залежи урана обнаружены на территории Соединённых Штатов Америки, примерно 40% мировых запасов урановых руд сосредоточено на Североамериканском континенте.

Геологическая наука такого феномена объяснить пока точно не может. Некоторая часть учёных утверждает, что территория США является наиболее разработанной в геологическом плане, практически отсутствуют белые пятна, в то время как в других странах таких пятен много.

Чего далеко ходить, взять хотя бы нашу страну, в которой вот уже почти 20 лет геологическая полномасштабная разведка не ведётся. Дело в том, что у геофизиков есть целая теория о равномерном распространении радиоактивных элементов в литосфере нашей планеты.

В соответствии с этой теорией запасы радиоактивных руд прямо пропорциональны площади литосферы, в рассматриваемом случае – площади, занимаемой тем или иным государством. Если это так на самом деле, то и по залежам урана мы впереди планеты всей.

По оценкам специалистов, запасов радиоактивных руд, пригодных для современного и перспективного производства энергии хватит надолго. **Ориентировочно на 2000 лет.** И этот прогноз радует, потому что запасы углеводородов исчерпаются раньше, если конечно они не являются продуктами деятельности Земли.

Конечно, ядерная энергетика в настоящее время не может заменить традиционные ТЭЦ, но как существенное дополнение к ним с отчётливо видимыми перспективами, может рассматриваться вполне.

5.2. Атомные энергетические установки

Впервые самоподдерживающаяся цепная реакция деления атомных ядер тяжёлых химических элементов под действием медленных нейтронов была осуществлена под руководством итальянского ученого Энрико Ферми в США 2 декабря 1942 г на ядерном реакторе CP – 1.

Реактор, построенный под трибунами Чикагского стадиона (стадион эксплуатировался в обычном режиме), состоял из графитовых блоков, между которыми располагались шары, изготовленные из природного урана и его двуокиси.



Рис. 5.7. Ядерный реактор Ф – 1

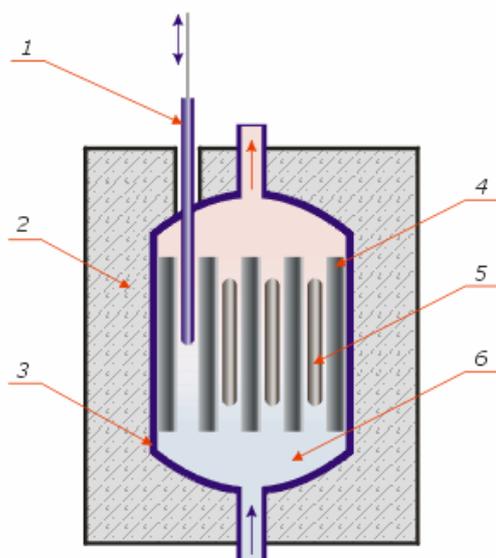


Рис. 5.8. Схема ядерного реактора: 1 – управляющий стержень, 2 – биологическая защита, 3 – теплоизоляция, 4 – замедлители нейтронов, 5 – ядерное топливо, 6 – теплоноситель

Графит в реакторе Ферми служил замедлителем, быстрые нейтроны проходя через графит уменьшали свою скорость до теплового уровня и превращались в медленные нейтроны, которые захватывались ядрами урана U^{235} , разваливая с образованием новых нейтронов (рис. 5.6).

Реактор аналогичной конструкции под руководством И.В. Курчатова был запущен в СССР 26 декабря 1946 г. Реактор CP – 1 был выполнен в виде графитовой сферы диаметром около 7,5 м. В центральной части шара в отверстия в графите вставлялись урановые стержни.

Первые реакторы CP – 1 и Ф – 1 не имели системы отвода тепла, поэтому эксплуатировались на самом низком уровне поддержания цепной реакции, при этом извлекаемая энергия исчислялась максимум единицами ватт.

В СССР в 1949 г. был введён в эксплуатацию реактор по производству плутония, а в 1954 г. заработала Обнинская АЭС. В настоящее время по данным МАГАТЭ во всём мире эксплуатируется 441 ядерный реактор в 30 странах, в стадии строительства находятся ещё 44 реактора.

На рис. 5.8 приведена упрощённая схема современного ядерного реактора на медленных нейтронах.

В качестве источника энергии в таких устройствах используется, как правило, природный уран, состоя-

щий из смеси трёх изотопов урана: U^{238} (99,28%), U^{235} (0,7%), U^{234} (0,006%). Ядра урана 235 при захвате медленного нейтрона распадаются, выделяя энергию и по два или три новых нейтрона.

В принципе, АЭС отличается от ТЭС только способом получения тепла. В АЭС возбуждают ядерную реакцию в топливных тепловыделяющих элементах 5, выделяемое тепло отбирается из активной зоны теплоносителем 6 и далее после теплообменника подаётся на турбину по классической схеме.

Превращение вещества на ядерном уровне сопровождается выделением имеющейся в нём свободной энергии. В рассматриваемом случае имеет место, так называемая, экзоэнергетическая реакция, характеризующаяся тем, что в следующем за возбужденным состоянием энергии выделяется больше, чем требуется для генерации процесса.

В случае молекулярных превращений, т.е. процессов на уровне электронных оболочек (химические реакции) повышение температуры реагирующих продуктов происходит на сотни и единицы тысяч градусов, например, при окислении взрывчатых веществ. В ядерных реакциях температура повышается на миллионы градусов, что свидетельствует о значительном энергетическом выходе реакции.

Состояние ядерного реактора принято характеризовать эффективным **коэффициентом размножения нейтронов k** или **реактивностью реактора ρ** , которые связаны простым соотношением

$$\rho = \frac{k-1}{k} = 1 - \frac{1}{k}.$$

При $k > 1$ количество делящихся в единицу времени материнских ядер увеличивается, реактор находится в надкритическом состоянии, реактивность реактора $\rho > 0$. При $k < 1$ реакция затухает, реактор находится в подкритическом состоянии, $\rho < 0$. Рабочий режим реактора характеризуется $k = 1$, $\rho = 0$, число актов деления ядер в единицу времени постоянно, реактор находится в стабильном критическом состоянии. Условие критичности реактора определяется уравнением

$$k = k_0 \omega,$$

где ω – доля полного числа образующихся в реакторе нейтронов, поглощённых в активной зоне, k_0 – коэффициент размножения нейтронов в активной зоне бесконечно больших размеров, определяемый уравнением

$$k_0 = \mu \Phi \theta \eta,$$

где μ – коэффициент размножения, ϕ – вероятность избежания резонансного захвата, θ – коэффициент использования тепловых нейтронов, η – выход нейтронов за один захват. Рабочий режим характеризуется $k < k_0$, если $k_0 < 1$, то цепная самоподдерживающаяся реакция в данном веществе не возможна. Величина k_0 определяет принципиальную возможность среды размножать нейтроны.

Основным элементом АЭС является активная зона с ядерным топливом, помещённая в герметичный корпус, заполненный теплоносителем (рис. 5.9), а при необходимости и замедлителем нейтронов.

В качестве замедлителя используются вещества способные уменьшать кинетическую энергию нейтронов примерно до 1 эВ. Чаще других в качестве замедлителей используется очищенный графит и тяжёлая вода, иногда и обычная вода.

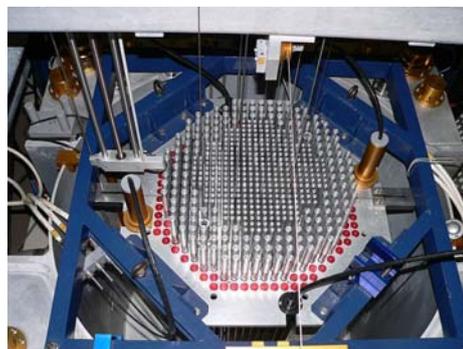


Рис. 5.9. Активная зона реактора

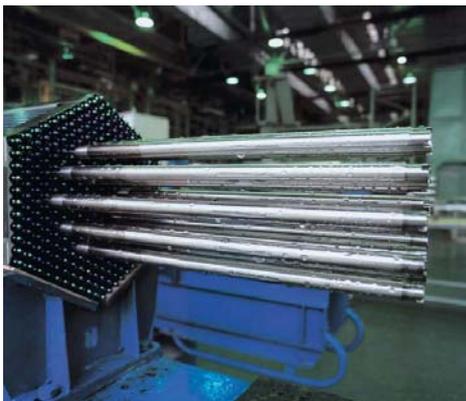


Рис. 5.10. Тепловыделяющие элементы

Основными элементами активной зоны являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), в которых упаковано ядерное горючее (рис. 5.10).

Активную зону реактора окружают дополнительно отражателем уменьшающим утечку нейтронов, которые частично рассеиваются, а частично возвращаются в активную зону.

Отвод тепла от ТВЭЛов производится теплоносителем, циркулирующим через активную зону. В качестве теплоносителя, как правило, применяется вода, которая в своём

естественном состоянии обладает подходящими физическими свойствами, прежде всего, высокой удельной теплоёмкостью и большой теплопроводностью. Эти показатели лучше только у жидких щелочных металлов, но они уступают воде по доступности и эксплуатационным характеристикам.

В зависимости от энергии используемых нейтронов ядерные реакторы подразделяются на работающие с тепловыми, промежуточными и быстрыми нейтронами. В реакторах на тепловых нейтронах происходит расщепление ядер U^{235} нейтронами с энергиями, соответствующими энергиям теплового движения атомов, т.е., в районе 1 эВ. В реакторах на промежуточных нейтронах их энергия колеблется в пределах $1 - 1 \cdot 10^3$ эВ, в реакторах на быстрых нейтронах используются энергии более $1 \cdot 10^3$ эВ.

Рассмотрим особенности конструкции ядерного реактора на быстрых нейтронах на примере реактора БН – 600 с электрической мощностью 600 МВт [56]. В соответствие с конструкторской документацией он называется: «Корпусной реактор – размножитель с интегральной компоновкой оборудования». В реакторе применена трёхконтурная тепловая схема: в первых двух контурах в реакторах этого типа циркулирует жидкий натрий, в третьем – вода и её пары.

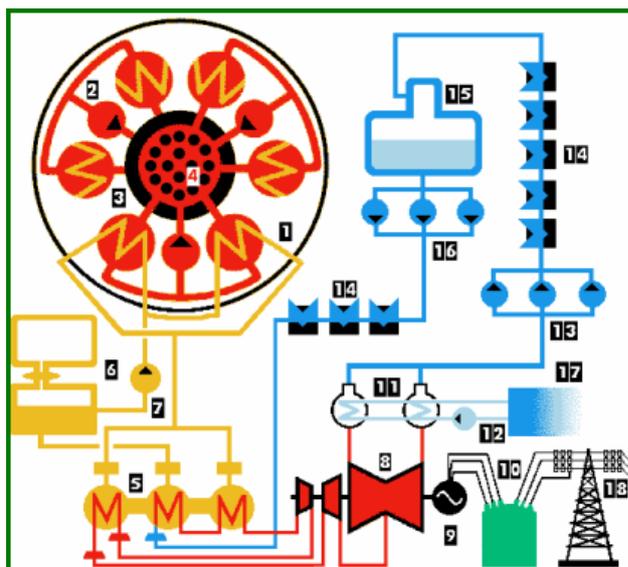


Рис. 5.11. Тепловая схема реактора БН – 600

На рис. 5.11 приведена тепловая схема блока, где приняты следующие обозначения: 1 – реактор; 2 – главный циркуляционный насос 1 контура; 3 – промежуточный теплообменник; 4 – тепловыделяющие сборки; 5 – парогенератор; 6 – буферная и сборная емкости; 7 – главный циркуляционный насос 2 контура; 8 – турбоустановка; 9 – генератор; 10 – трансформатор; 11 – конденсаторы; 12 – циркуляционные насосы; 13 – конденсатные насосы; 14 – подогреватели; 15 – деаэратор; 16 – питательные насосы; 17 – пруд-охладитель; 18 – отдача электроэнергии.

Конструкция энергоблока показана на рис. 5.12. Энергоблок состоит из: шахты – 1; корпуса – 2; 3-главного циркуляционного насоса – 3, обслуживающего 1 контур; электродвигателя насоса – 4; большой поворотной пробки – 5; радиационной защиты – 6; теплообменника "натрий-натрий" – 7; центральная поворотной колонны с механизмами СУЗ – 8; активная зона.

Реактор БН – 600 изготовлен по «интегральной» схеме компоновки оборудования. По этой схеме активная радиоактивная зона и всё оборудование первого контура, включая главные циркуляционные насосы и промежуточные теплообменники размещаются в защищённом от внешней среды корпусе реактора цилиндрической формы с эллиптическим дном и съёмной конической верхней крышкой. В верхней крышке имеется 11 люков для технологического обслуживания реактора в процессе его эксплуатации.

Активная зона воспроизводства состоит из шестигранных тепловыделяющих сборок (ТВС) кассетного типа. ТВС состоит из твэлов, кожуха и устройства для захвата манипуляторами. Твэлы по длине заполнены втулками из обогащённой окиси урана и окиси плутония. Ниже активной зоны располагаются торцевые экраны из брикетов «отвального» урана. Газовые полости над уровнем натрия в реакторе заполнены аргоном.

Первый контур для обеспечения безопасной работы включает в себя три параллельные петли, каждая из которых состоит из промежуточных теплообменников. Жидкий натрий насосами подаётся в напорную камеру реактора, откуда распределяется по ТВС активной зоны и зоны воспроизводства. Циркулирующий в области активной зоны натрий имеет температуру 520 – 550 °С.

Во втором контуре так же в качестве теплоносителя используется жидкий натрий. Во втором контуре происходит бесконтактный теплообмен, причём натрий второго, не радиоактивного контура находится при большем давлении, чтобы в случае протечек радиоактивного натрия он не попал во второй контур.

Второй контур так же состоит из трёх параллельных петель, по которым циркулирует натрий с температурой 520 °С. Далее натрий второго контура подаётся в парогенератор, где происходит перегрев пара в третьем контуре, так же состоящем из трёх петель. Перегретый пар после третьего контура направляется в турбину с нормальной мощностью 210 МВт.

Управление параметрами работы реактора, его реактивностью, осуществляется 19 компенсационными стержнями, 2 стержня служат для автоматического режима поддержания реактивности на заданном уровне, а 6 стержней для аварийного вывода реактора из рабочего режима. Перезагрузка ТВС реактора осуществляется без непосредственного участия обслуживающего персонала, дистанционно. Реактор снабжён двумя резервными системами электропитания, включая автоматически запускаемые дизельные генераторы.

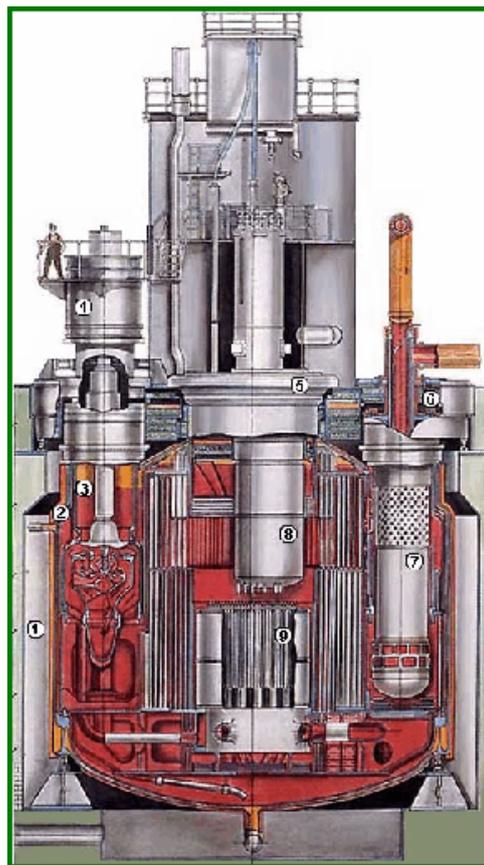


Рис. 5.12. Конструкция БН – 600

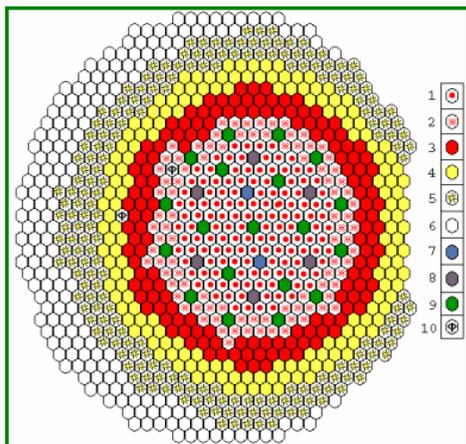


Рис. 5.13. Картограмма загрузки

На рис. 5.13 показана картограмма загрузки реактора БН – 600: 1 – ТВС активной зоны с малым обогащением; 2 – ТВС активной зоны со средним обогащением; 3 – ТВС активной зоны с большим обогащением; 4 – ТВС внутренней зоны воспроизводства; 5 – ТВС внешней зоны воспроизводства; 6 – хранилище отработавших сборок; 7 – стержни автоматического регулирования; 8 – стержни аварийной защиты; 9 – компенсирующие стержни; 10 – фотонейтронный источник.

Создание ядерного реактора БН – 600 проводилось с учётом богатого позитивного и негативного, как собственного, так и иностранного опыта эксплуатации подобных устройств. Главной целью учёных, конструкторов и инженеров было создание безопасного в радиационном и экологическом плане ядерного реактора. В этом реакторе применена беспрецедентная глубоко эшелонированная система защиты.

С момента пуска в эксплуатацию энергоблока БН – 600 было выработано 69 млрд кВт·ч электроэнергии. Коэффициент использования календарного времени составил 77%, это очень высокий показатель. Время ремонтных и профилактических работ составило всего 21% общего эксплуатационного времени, производственные простои по непредвиденным причинам составили 2%, что является хорошим показателем для такой сложной инженерной системы.

Следует учесть, что этот ядерный энергоблок был введён в эксплуатацию 33 года назад. В этом 2012 г. должна окончиться плановая эксплуатация реактора, но сейчас рассматриваются возможности гарантированного продления его работы ещё на 10 лет.

Перед тем, как рассмотреть энергетические параметры ядерных реакторов, напомним, что $1 \text{ МэВ} \approx 1,7 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$. При однократном делении ядра урана выделяется около 200 МэВ энергии, что соответствует энергии $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{с}$. Для получения мощности 1 Вт требуется, чтобы были расщеплены $3,1 \cdot 10^{10}$ ядер. Другими словами, для получения 1 Вт в секунду должны распасться $3,1 \cdot 10^{10}$ ядер. Деление 1 моля активного вещества, содержащего $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$ атомов, выделится энергия

$$p_{\text{ц}} \approx 6 \cdot 10^{23} \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} = 1,93 \cdot 10^{13} \text{ Вт} \cdot \text{с},$$

при делении 1 г урана высвобождается энергия $8,2 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Для получения такой энергии необходимо сжечь около 3 т угля. Как говорится, без комментариев.

В настоящее время широкое распространение в России, странах СНГ и в дальнем зарубежье получили водо-водяные энергетические реакторы ВВЭР – 1000 (рис. 5.14), которые изготавливаются в виде тепловыделяющих сборок (ТВС). Схема такого реактора приведена на рис. 5.14, где приняты следующие обозначения [58, 59]: 1 – верхний блок; 2 – привод СУЗ(системы управления и защиты); 3 – шпилька; 4 – труба для загрузки образцов-свидетелей; 5 – уплотнение; 6 – корпус реактора; 7 – блок защитных труб; 8 – шахта; 9 – выгородка активной зоны; 10 – топливные сборки; 11 – теплоизоляция реактора; 12 – крышка реактора; 13 – регулирующие стержни; 14 – топливные стержни; 15 – фиксирующие шпонки.

Ядерный реактор ВВЭР – 1000 геометрически представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем. В корпусе размещается активная зона и устройства управления и технологического обслуживания.

Реактор сверху закрыт герметичной радиационно непроницаемой крышкой в которую через уплотнения подходят электрические кабели и устройства регулировки мощности.

Первый контур реактора состоит из 4 параллельных петель транспортировки теплоносителя в качестве которого используется вода, нагрев которой происходит в активной зоне за счёт тепловыделения в твэлах, заполненных слабо обогащённой двуокисью урана U^{235} , которая непрерывно используется в течение трёхлетнего топливного цикла. Срок службы реактора составляет 30 лет.

Управление реактивностью реактора осуществляется перемещением регулирующих стержней и изменением концентрации борной кислоты. Энергетическая схема реактора представлена двумя контурами.

Первый контур радиоактивный, второй – не радиоактивный. Энергоблок имеет 6 циркуляционных петель. Циркулирующая в первом контуре под высоким давлением вода одновременно служит в качестве замедлителя нейтронов.

Активная зона реактора собрана из шестигранных тепловыделяющих сборок. В состав первого контура входят: реактор, парогенератор, главный циркуляционный контур, система компенсации давления, система подпитки и очистки контура, система аварийного охлаждения, газовые продувки, система компенсации протечек.

Энергия деления ядерного топлива в активной зоне реактора общей тепловой мощностью 3000 МВт снимается теплоносителем с температурой $322^{\circ}C$, при расходе воды в первом контуре 15800 кг/с и давлении 16 МПа.

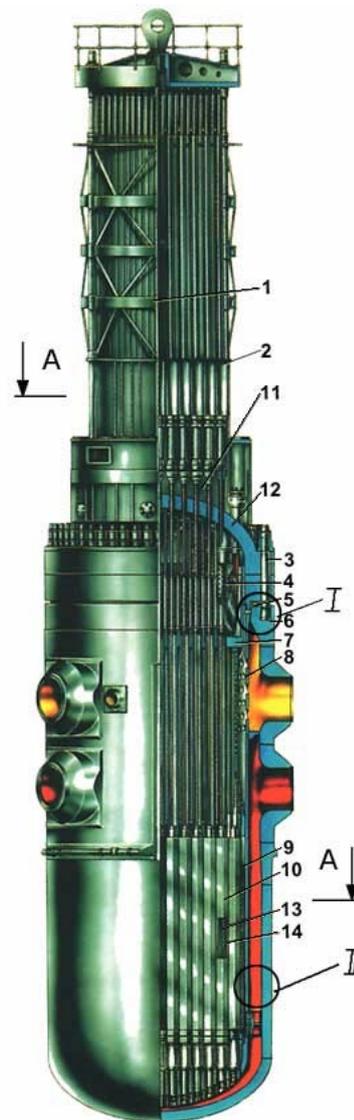


Рис. 5.14. Устройство реактора ВВЭР – 1000

5.3. Атомный ледокольный флот

Ядерные реакторы получили довольно широкое распространение, как на гражданском, так и на военном флоте. Специалистов привлекали, прежде всего, относительно высокие удельные мощности (отношение мощности к массе) атомных силовых установок. Для традиционных источников энергии, например дизельных, увеличение мощности неминуемо приводит к возрастанию их массы.

Естественно, что использование энергии атома в достаточно ограниченных по объёму судовых условиях накладывает дополнительные требования к обеспечению радиационной безопасности экипажей. Учёные, конструкторы и инженеры, как у нас, так и за рубежом научились решать такие технически сложные задачи.

Судовые атомные силовые установки отличаются от традиционных паросиловых агрегатов только способом получения пара. На рис. 5.15 приведена схема типичной атомной силовой установки, включающей в себя такие обязательные элементы как: 1 – реактор, 2 – первичную биологическую защиту, 3 – вторичную биологическую защиту, 4 – теплообменный генератор пара, 5 – нагревательный элемент первого контура, 6 – циркуляционный насос первого контура, 7 – турбина высокого давления, 8 – турбина низкого давления, 9 – редуктор, 10 – конденсор, 11 – насос вторичного контура, 12 – трубопровод входа морской воды, 13 – трубопровод выхода морской воды.

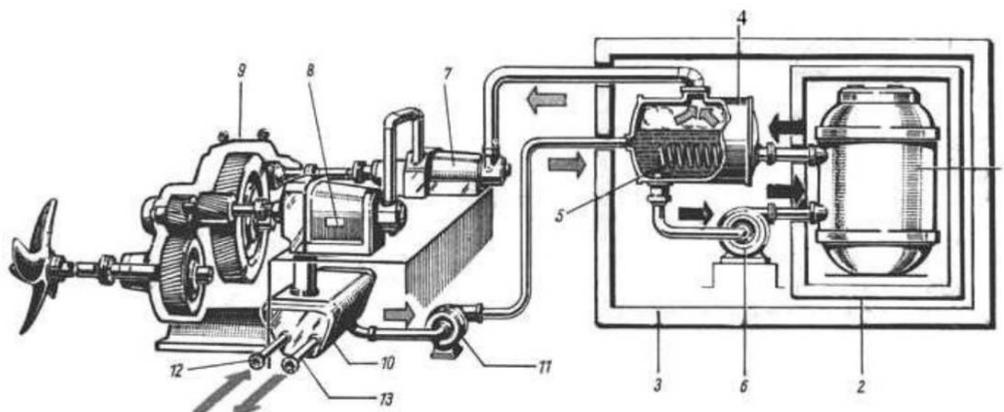


Рис. 5.15. Схема судовой атомной силовой установки

На рис. 5.16 приведена фотография ядерного реактора первого в мире атомного ледокола «В.И. Ленин».

Первый гражданский атомоход, был спущен на воду в 1959 г. в СССР. Это был легендарный ледокол В.И. Ленин, на котором были установлены три независимых ядерных реактора, два из которых работали постоянно, а третий включался в особо тяжёлых ледовых условиях или при регламентных работах на основных реакторах.

Мощность силовой установки ледокола составляла 44 000 л.с. (33 МВт). Судно имело водоизмещение 17800 т, каждая т массы была обеспечена 3 л.с., что позволяло в спокойной воде двигаться со скоростью 18 узлов (33 км/час), а в режиме ледокольного хода при толщине покрова до 2,5 м со скоростью 2 узла (3,7 км/час).



Рис. 5.16. Судовой ядерный реактор и атомный ледокол «В.И. Ленин»

Атомоход мог трижды совершить кругосветное плавание без заходов в порт для перезаправки реакторов. Атомный ледокол В.И. Ленин мог снабжать электроэнергией город с пятисот тысячным населением.

Наибольшая длина ледокола составляла 134 м, ширина 27,6 м, высота борта 16,1 м. Ледокол представлял собой своеобразную лабораторию, в которой отрабатывались технологии применения ядерных реакторов на флоте.

На судне прошли всесторонние испытания двух типов атомных генерирующих пар установок. Первый вариант силовой установки отработал в течение шести навигаций продолжительностью по 140 – 160 суток каждая.

Второй вариант силовой установки был смонтирован на судне в июне 1970 г. В дальнейшем аналогичными силовыми агрегатами были оборудованы отечественные ледоколы «Арктика», «Сибирь» и «Россия».

Первая арктическая экспедиция ледокола началась 19 августа 1960 г и продлилась почти 100 суток. За это время судно прошло более 10 000 морских миль, из которых более 7 000 миль в тяжёлых ледовых условиях, которые для обычных ледоколов считались непреодолимыми.

Славную историю отечественного атомного флота продолжил ледокол «Арктика», который был построен в 1975 г. на Балтийском заводе г. Ленинграда.

Ледокол располагал высокими бортами и четырьмя палубами и пяти ярусной надстройкой (рис. 5.17).

В движение ледокол приводился тремя четырёх лопастными гребными винтами фиксированного шага.

Ядерный реактор силовой установки располагался в изолированном отсеке средней части корпуса, выполненного из высокопрочной легированной стали.



Рис. 5.17. Атомный ледокол «Арктика»

В области наиболее интенсивных ледовых нагрузок корпус был усилен специальным ледовым поясом. Судно было оборудовано дифферентной и креновой системами регулировки положения корпуса относительно абсолютной вертикали и горизонтали.

Для ведения воздушной ледовой разведки на «Арктике» базировался вертолёт Ми – 2, который мог взлетать и садиться на площадку, оборудованную на палубе.

В отличие от первого поколения ледоколов, на «Арктике» силовая установка и системы жизнеобеспечения работали в автоматическом режиме с центрального поста управления ходового мостика. Главный щит в части управления гребными электродвигателями дублировался кормовым постом управления.

За первые два года эксплуатации «Арктика» неоднократно вызволял из ледового плена ледоколы с традиционными силовыми агрегатами, которые не могли вывести караваны на чистую воду.

В частности, был вызволен из ледового плена ледокол «Ермак» с сухогрузом «Капитан Мышевский» и ледокол «Ленинград» с транспортом «Челюскин». В первые два года эксплуатации «Арктики» наряду с выполнением народнохозяйственных планов северного завоза решались научно-технические задачи, потому что «Арктика» была головным судном и перед запуском серии, необходимо было убедиться, в оптимальности применяемых научно-технических решений.

В первые же рейсы «Арктика» поразила даже опытных полярных капитанов своими возможностями продираться сквозь вековые северные льды.

Вот как свои впечатления изложили участники ледовых походов В.А. Спмчкин и В.А. Шамотьев: «...Ледокол форсирует напролом, скорость его продвижения, конечно, невелика, но зато сам ход необычайно красив. Как известно, ледокол разрушает прочный лед не ударом форштевня, а продавливая его своей массой: чем прочнее лед, тем большая часть ледокола должна вползти на него, чтобы вызвать разрушение.

При этом место разломов льда смещается от носовой части к середине судна. При разрушении очень прочного льда места ломки смещаются настолько далеко от форштевня, что они даже не просматриваются из передних иллюминаторов ходовой рубки.

Это создает фантастическое впечатление, будто весь огромный атомоход скользит по льду, как аэросани. Это тихое плавное продвижение, когда перед носом судна не видно ни трещины, ни ломающегося льда, ни фонтана ледяных брызг, делает эффект скольжения столь реальным, что, кажется, за кормой ледокола не должно быть обычного канала.

Но взгляд назад, за корму, где по-прежнему темнеет широкая дорога чистой воды, убеждает, что ледокол не скользит, а крушит эти поля многолетнего льда. Возле средней части ледокола дыбятся стотонные глыбы раздавленного льда».

На рис. рис. 5.17 показана схема продвижения ледокола в ледяном массиве. Ледокол форштевнем подходит к кромке льда (фрагмент 1) заползает на лёд (фрагмент 2) и своей массой откалывает ледяные глыбы. Система управления дифферентом на нос может обеспечивать дополнительное утяжеление носовой части судна.



Рис. 5.17. Схема движения ледокола во льдах

Атомный ледокол «Арктика» первым из всех судов достиг географической точки, соответствующей Северному полюсу нашей планеты.

Научная экспедиция ледокола началась 9 августа 1977 г из порта приписки Мурманск (рис. 5.18) ледокол «Арктика» с экипажем в 200 человек проследовал мимо Новой Земли по 130 меридиану в море Лаптевых и взял курс на Северный полюс.

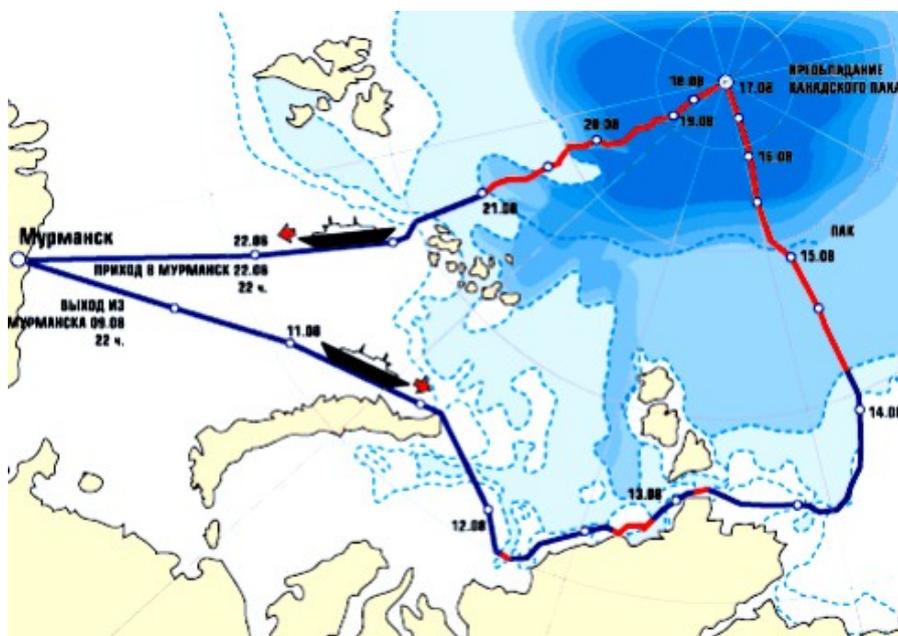


Рис. 5.18. Маршрут плавания к Северному полюсу

Так как подобное плавание было предпринято впервые и могли произойти всякие неприятности, то ледокол был подготовлен к восьмимесячному автономному плаванию.

В состав бортового оборудования входили тяжёлые гусеничные механизмы для постройки в арктических условиях аэродрома, разборные щитовые домики, аэросани, автономная электростанция.

Готовились к самым экстремальным ситуациям, на случай, если экипажу придётся покинуть аварийное судно и высаживаться на лёд. Таких случаев с первопроходцами даже в более низких широтах было предостаточно.

Опасались многого. Опасались за целостность корпуса, за поведение ядерного реактора, за целостность винтов, которые могли быть повреждены льдом, опасались за системы навигации, которые при подходе к полюсу ведут себя не вполне адекватно.

Однако отечественная наука и отечественное судостроение снабдила участников экспедиции уникально надёжным судном. 17 августа 1977 г. в 4 часа утра по московскому времени «Арктика» пройдя без особых задержек мощный ледяной покров Центрального полярного бассейна, впервые в мировой практике достиг в активном режиме плавания географической точки Северного полюса.

В 9 часов 40 минут по московскому времени над Северным полюсом, на самой что ни на есть макушке Земли был поднят флаг Союза Советских Социалистических Республик. Практически все члены экспедиции совершили «кругосветное путешествие» вокруг десятиметровой мачты с государственным флагом Родины. Иные и не единожды, благо, что путь был не длинным, если по кругу, то метров 20 в диаметре.

На полюсе под воду были спущены водолазы для осмотра корпуса и винтов. Серьёзных повреждений, влияющих на жизнеобеспечение и технические характеристики судна, обнаружено не было. Обратный путь к Мурманску пролегал, практически, по прямой. Маршрут проходил через ледовые районы, по которым не ходило до этого ни одно судно.

Вояж на Северный полюс окончился более чем успешно, доказав, что отечественный атомный ледокольный флот способен работать в экстремальных условиях. Учёные, инженеры, судостроители и арктические судоводители подтвердили свой высочайший мировой рейтинг.

С появлением в СССР атомного ледокольного флота навигационный период в Арктике увеличился до 8 месяцев в году, а на западном участке навигация **не прекращалась круглый год**.

20 февраля 1981 г. на судовой верфи им. Серго Орджоникидзе в Ленинграде был заложен третий атомоход серии «Арктика», который известен как «Россия», 2 ноября 1983 г. судно было спущено на воду. Наибольшая длина ледокола составляла 150 м, наибольшая ширина – 30 м, высота надводного борта 17,2 м, водоизмещение 22920 регистровых тонн.



Рис. 5.19. Атомный ледокол «Россия»

Турбоэлектрическая атомная установка развивала мощность 75 000 л.с., максимальная скорость хода на чистой воде – 21 узел (≈ 40 км/час). В 1985 г. атомоход принят в эксплуатацию (рис. 5.19). В отличие от предыдущих образцов атомоходов «Россия» имела более защищённые от ледовых повреждений винты, упрочнённый корпус и всепогодный вертолёт Ка – 32. Экипаж ледокола располагался в 149 каютах, 120 из которых были одноместные,

14 – двухместные, 4 – шестиместные каюты для временного персонала – курсантов, проходящих практику.

Атомные ледоколы последнего поколения «Вайгач» и «Таймыр» по отечественному проекту были построены на судовой верфи «Вяртсиля Морская Техника» в Финляндии, однако ядерные реакторы были поставлены из СССР. Эти ледоколы имели малую осадку и могли круглогодично заходить в северные реки, покрытые ледовым панцирем, делая их судоходными. Главная атомная силовая установка имела мощность 50 000 л.с., что позволяло двигаться в условиях льда двухметровой толщины (рис. 5.20).



Рис. 5.20. Атомные ледоколы «Вайгач» и «Таймыр»

5.4. Военный атомный флот

Идея применения подводных лодок в военных целях была впервые высказана гением всех народов Эпохи Возрождения незабвенным Леонардо да Винчи.

Первая реальная лодка, способная некоторое время пребывать под водой была построена в Англии голландским инженером Корнелиусом ван Дреббелем и испытана англичанами в 1620 г.

Лодка приводилась в движение вёслами. В России первые подводные лодки пытались построить во времена Петра I.

Во время Первой мировой войны появились лодки движимые в надводном положении дизельными двигателями, а в подводном – электромоторами.

Всего за время военных действий было построено более 600 лодок, которым удалось пустить ко дну 55 линкоров и крейсеров, 105 эсминцев и 33 субмарины.

Другими словами, в начале XX в. подводные лодки переросли экзотическую стадию своего развития, превратившись в самостоятельную морскую ударную силу, определяющую морской военный потенциал.

До совсем недавнего времени подводные лодки были ныряющими. Использование при подводном плавании в качестве приводов винтов электромоторов, питаемых аккумуляторами, не позволяло находиться в подводном положении длительное время.

Аккумуляторы требовалось довольно часто подзаряжать, для этого лодка всплывала, и на ней запускались дизельные двигатели. Кроме того, время подводной автономности ограничивалось составом воздуха на борту. С течением подводного плавания концентрация кислорода уменьшалась, а углекислого газа – росла.

Во времена Великой Отечественной войны немецкие инженеры стали использовать на своих подводных лодках специальное устройство – шноркель (рис 5.21). Шноркель (дыхательная трубка) позволял подавать атмосферный воздух в дизели без всплытия на поверхность.

Лодка, конечно, всплывала, но на поверхности был виден только конец шноркеля, трудно различимый на расстоянии, в частности с самолетов. Таким образом, подводные лодки не удовлетворяли в полной мере своему основному назначению – скрытно и быстро добираться до объектов противника.

Лодки стали подводными, в полном смысле этого слова, только с появлением на них ядерных реакторов.

Первая атомная подводная лодка (АПЛ) Nautilus (SSN-571) появилась в США. В январе 1954 г. на верфи Гротона штата Коннектикут она была спущена на воду (рис.5.22), уже в августе 1958 г. в подводном положении прошла подо льдами Северного полюса, что свидетельствовало о беспрецедентных возможностях субма-

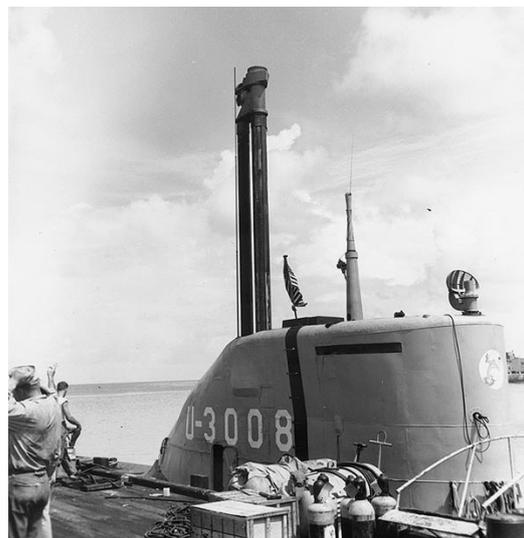


Рис. 5.21. Шноркель подводной лодки



Рис. 5.22. АПЛ «Наутилус»

скрытно достигшая территориальных вод предполагаемого противника, могла уничтожить целое государство.

На мировой арене появился источник разрушительной энергии невиданной концентрации. Естественно, что открывшиеся уникальные разрушительные возможности не преминули генерировать сумасшедшую гонку, в которой участвовали политики, учёные, конструкторы, инженеры и техники.



Рис. 5.23. АПЛ «Ленинский комсомол»

витационным шумом. Пришлось для таких больших подводных скоростей проектировать специальные безкавитационные винты.

Американский наutilus имел корпус с обводами традиционными для дизельных лодок, поэтому в подводном положении обладал высоким коэффициентом сопротивления, что снижало скоростные характеристики. Корпус лодки «Ленинский комсомол» изначально проектировался для скорости подводного хода до 25 узлов, он имел каплевидную форму и плавные обводы, характерные для китов и касаток.

Много было нового. Новая техника, новые правила поведения экипажа, новые условия обитаемости. Трудно было привыкать старым морякам к тому, что АПЛ уходили в автономные плавания не на недели, а на месяцы.

Доходило временами до смешного. По предложению военмором (по примеру американцев) предлагалось каждую АПЛ комплектовать двумя экипажами, которые должны были сменять друг друга. Однако самые главные сухопутные военачальники считали, что это традиционные причуды моряков и такой ход событий пресекли волевым порядком, что впоследствии создало большие эксплуатационные трудности.

рин с ядерными реакторами. Лодка имела длину 97 м, ширину 8,2 м и водоизмещение 4092 регистровых тонны.

Под водой «Наутилус» мог развивать скорость до 20 узлов (≈ 37 км/час). К этому времени подоспели соответствующих габаритов ракеты с атомной начинкой, которые можно было размещать в стеснённых условиях подводных кораблей. Получалось, что одна атомная подводная лодка,

Военно-морской флот Советского Союза первую АПЛ получил в 1957 г. Первые ходовые испытания прошли не совсем удачно, впрочем, как и у американцев.

Подводные атомоходы были делом новым и сложным. Например, при испытаниях первой отечественной лодки «Ленинский комсомол» (рис. 5.23) выяснилось, что при подводной скорости 30 узлов (≈ 56 км/час) на винтах начиналась кавитация, которая создавала такой шум, что лодка становилась «глухонемой», гидроакустика была парализована ка-

Наибольшая длина лодки «Ленинский Комсомол» составляла 107,4 м, ширина – 7,96 м, подводное водоизмещение – 4069 регистровых тонн, скорость надводного хода – 15,5 узлов (29 км/час).

Максимальная скорость в подводном положении – 30 узлов (≈ 56 км/час), глубина погружения – 300 м, автономность – 60 суток, неограниченная дальность плавания.

Экипаж – 140 моряков, вооружение – 8 носовых и 2 кормовых торпедных аппаратов.

В июле 1962 г. «Ленинский комсомол» пройдя подо льдами, всплыл на Северном полюсе (рис. 5.24).

По изначальному замыслу военных стратегов, исключительно сухопутного вероисповедания, первая АПЛ должна была быть вооружена одной торпедой с ядерным зарядом.

Предполагалось, что лодку буксирами должны были доставить в точку погружения, где она, нырнув, скрытно подбиралась к вражеской военно-морской базе и выпускала торпеду, которая стирала базу с поверхности земли.

Когда с проектом ознакомились моряки, то посчитали уместным наметнуть стратегам, что в мире имеется всего две военные базы, которых торпеда может достичь по прямолинейной траектории. А торпеда планировалась не хилая: более полутора метров в диаметре и 23 м в длину.

Выстрел такой махиной для лодки был чреват возникновением большого дифферента, который мог не быть компенсирован продувкой балластных цистерн, что автоматически приводило к демаскировке судна и его неминуемое уничтожение. Проект торпеды – гиганта торжественно приказал долго жить.

Экипаж первой отечественной АПЛ, собранный со всех флотов из числа самых достойных, проходил подготовку под Москвой в г. Обнинске на первой в мире атомной электростанции (рис. 5.1). Собственно, строили и запускали этот обнинский реактор больше для научно-исследовательских работ и опытно-конструкторской эксплуатации, а главное – для подготовки экипажей первых отечественных атомных лодок.

Станция была оборудована морским ядерным реактором. Надо сказать, что сведений о влиянии реактора на окружающую среду и на человека было мало. После первых испытаний атомного оружия было ясно, что энергия при взрыве освобождается невообразимая, а вот с научными подробностями было слабовато.

В этой связи первые моряки – атомщики со своими наставниками и командирами часто действовали буквально в слепую, допуская трагические ошибки. Например, по флотской традиции делали бесконечные приборки, даже не подозревая, что обыкновенная пыль пролежавшая в активной зоне некоторое время становится радиоактивной, опасной для здоровья человека.

Индивидуальная дозиметрия была развита крайне слабо. Бытовало мнение, что 150 гр. спирта начисто снимают радиоактивные последствия в организме. По этому параметру нация к освоению атомной энергии была готова более многих иных.

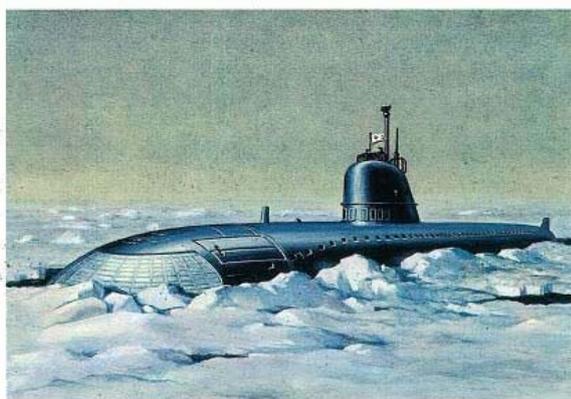


Рис. 5.24. АПЛ «Ленинский комсомол» на Северном полюсе

Первоначально были набраны шесть экипажей для будущих атомных лодок, в основном из моряков – сверхсрочников. До финиша дошли немногие. Одной из причин было резкое сокращение денежного довольствия.

Сухопутные отцы – командиры посчитали, что флотские, хоть и атомные, запросили слишком большое вознаграждение за свои услуги. Как это так, моряки будут получать существенно большую зарплату, чем в других родах войск. Уровняли. Большинство сверхсрочников уволились из рядов. Из шести первоначально набранных экипажей осталось неполных два. Остались энтузиасты, занимающиеся неизвестным делом не из-за денег, а что называется, под интерес.

Первый отечественный подводный атомоход, «К-3» проекта 627 был готов к встрече с экипажем 24 сентября 1954 г. Это была во всём необычная лодка от нетрадиционного силового агрегата, до обводов корпуса и внутреннего интерьера.

Внутренние помещения лодки были отделаны дорогими породами дерева, многофункциональная мебель была изготовлена по специальному заказу.

Так, например, стол в кают-компании в случае необходимости мог быть превращён в полнофункциональный операционный стол. При спуске на воду возникла не предвиденная трудность. По давней флотской традиции, при спуске на воду о борт вступающего в морскую жизнь судна разбивалась традиционная бутылка шампанского, а весь корпус новой лодки был покрыт толстым слоем звукопоглощающего прорезиненного покрытия.

Отрытыми были два участка в области ограждения горизонтальных рулей. Моряки народ суеверный, промаха не должно было быть. Вспомнили английские традиции, где бутылка, привязанная на шнуре, отпускалась женщинами из числа коронованных особ. Поскольку в СССР было не принято короновать особ, то эту миссию доверили сотруднице КБ «Малахит», которая мастерски пустила бутылку с нужное место. Спуск на воду состоялся, новое слово в отечественном судостроении было сказано, правда, шепотком. Проектирование и строительство лодки велось в строжайшей тайне.

После арктических подвигов экипаж «Ленинского комсомольца» был избалован вниманием, награды за поход к Северному полюсу экипажу вручал сам Никита Хрущёв. Экипаж больше участвовал в протокольных мероприятиях, чем исполнял служебные обязанности.

Неприятности не преминули случиться. Эксплуатация первой атомной лодки проходила во времена «великого противостояния» между СССР и США, страны постоянно поигрывали друг перед другом и перед остальным миром своими атомными мускулами. А тут стало известно, что в средиземное море на дежурство вышла американская АПЛ, нужен был адекватный ответ.

К походу был спешно подготовлен «Ленинский комсомол». Лодку укомплектовали сборным экипажем, назначили нового командира и буквально выпихнули в автономку.

На третьи сутки похода на «К-3» отказали кормовые горизонтальные рули, и отключилась система регенерации воздуха. Температура в отсеках поднялась до 40 °С, вспыхнул пожар. Несмотря на своевременные и героические действия экипажа на лодке погибли 39 подводников. Анализ аварии командованием ВМФ подтвердил правильные действия экипажа в сложившейся экстремальной ситуации. Оставшихся в живых моряков представили к правительственным наградам.

Такой ход событий совсем не устраивал партийных функционеров и сухопутное военное начальство. На лодку прибыла новая комиссия, которая в одном из носовых отсеков в личных вещах экипажа была обнаружена зажигалка. Вывод был скорым и дебиловатым.

Решили, что если на борту есть зажигалка, то ей могли пользоваться, а раз пользовались, то мог возникнуть пожар. А на то что на лодке более сотни километров кабелей, находящихся под напряжением, комиссия не обратила внимание.

Не обратили внимания и на то, что системы атомохода перед походом практически не тестировались. Спешили. Одним словом, партия, правительство и высшее армейское командование, как всегда, были правы, а экипаж – виновен. Представления на героев – подводников посчитали наглостью и вместо наград посыпались на экипаж взыскания.

В настоящее время не в меру демократизировавшиеся журналисты вбивают в неокрепшее сознание молодёжи идею о том, что наша Родина во все времена отставала в технологиях постройки атомного подводного флота от американцев.

Беззащитное враньё не имеющее под собой никаких оснований. Советские учёные и инженеры создавали образцы военной техники, которым не было аналогов. Типичным тому примером является отечественный атомоход проекта 661, по натовской классификации «Анчар» среди специалистов именуемый «Золотая рыбка» (рис. 5.25).

Это была первая в мире подводная лодка, корпус которой был изготовлен из титанового сплава, который даже в технической документации упоминался как «сплав № 3». Информация об этой лодке просочилась в прессу только в начале 90-х годов прошлого века, уже во времена, так называемой, перестройки.



Рис. 5.25. АПЛ пр.661 «Анчар»

Это был подводный корабль длиной 107 м, шириной 11,5 м, с подводным водоизмещением 6200 м³, с глубиной погружения 400 м, скоростью хода в подводном положении 42 узла (!!!).

Лодку перемещали в водных пространствах два ядерных реактора мощностью по 91 МВт каждый, мощность турбины 40 000 л.с. АПЛ несла на борту 10 крылатых ракет с подводным стартом. Экипаж лодки состоял из 80 моряков преимущественно из числа офицеров.

По поводу этой лодки шутили: «На 661 пр. капитан-лейтенанты швартовые отдают». Это был аппарат с очень высокой степенью насыщения электроникой и автоматикой. Неучам на этой лодке делать было нечего.

В 1959 г. принято постановление правительства о строительстве скоростной подводной лодки, началось проектирование. Перед учёными, конструкторами и инженерами была поставлена задача: создать скоростную подводную лодку, способную догонять и уничтожать любые подводные цели.

Через 7 лет конструкторская документация была готова и в 1966 г. корабль заложили, а уже в 1969 г. атомоход поступил в опытную эксплуатацию на Северный флот. Строительство и испытания новой, во многом уникальной лодки заняли всего 3 года, что тоже было своеобразным рекордом.

Проектирование лодки вело ЦКБ – 16 (нынешний «Малахит») под руководством академика Н.Н. Исанина, в этом коллективе поднаторевшем в проектировании надводных кораблей и их вооружения, не было специалистов по судовым

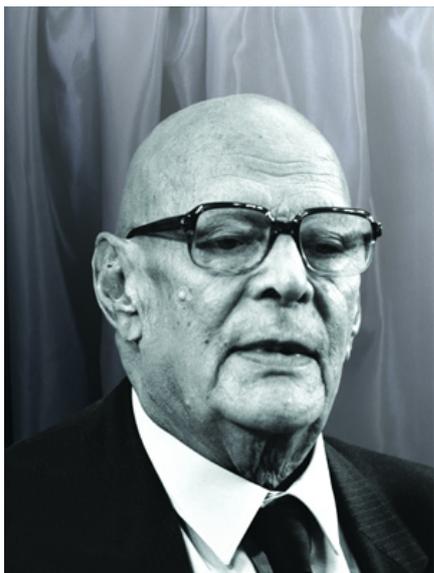


Рис. 5.26. Академик Александров А.П.

ядерным реакторам. К разработкам ядерного реактора нового поколения привлекли институт атомной энергии АН СССР им. И.В. Курчатова и лично ведущего специалиста по ядерной энергетике академика А.П. Александрова.

Проект настолько пересекретили, что при общении между более чем тысячами предприятий работавшими в проекте часто возникали многочисленные нестыковки.

Разные министерства, разные ведомства имели и разные стандарты на изделия, которые зачастую не стыковались друг с другом. Вопросы стыковки решали, так называемые, военпреды. И было славно, если военпред оказывался специалистом, а если просто хорошим человеком и отличником боевой и политической подготовки, то начинались заморочки, тормозящие выполнение поставленной задачи.

Титановый сплав был выбран в качестве материала корпуса исключительно из-за его высоких прочностных характеристик и малым по сравнению со сталью удельным весом. Плотность стали $\rho_{Fe} \approx 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а у используемого сплава $\rho_{Ti} \approx 4,45 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, удельная прочность конструкций возрастала на 25 %, а масса снижалась в 1,76 раза.

Килограмм титанового листа по тем деньгам и ценам стоил дороже килограмма чёрной икры, отсюда и погоняло «Золотая рыбка». В теперешней ценовой действительности проект обошёлся государству более 10 млрд. рублей.

Титановый корпус давался нелегко. Титан, поглощая водород, покрывается трещинами и теряет преимущества в прочности. Было необходимо при изготовлении титанового проката строжайше выдерживать рекомендованную технологию, что естественно же не всегда удавалось, тогда на судостроительном заводе в Северодвинске появлялись бракованные титановые листы. Из них нельзя было делать даже хлысты к удилищам, секретный был материал. Когда лодка была готова, то приняли решение не наносить резинового покрытия и даже не красить, чтобы было сподручнее проверять состояние корпуса чисто визуально.

Корпус лодки был сварным. Сварка производилась неплавящимися вольфрамовыми, легированными редкоземельными элементами, электродами в аргоновой среде в специальных герметичных камерах «Атмосфера».

В качестве присадки использовалась титановая проволока, отожжённая в вакууме, она до начала процесса сварки не должна была контактировать с атмосферой. В корпусном цехе обстановка по чистоте и стерильности не уступала сельской операционной. Сварщики работали в белых халатах и перчатках. Особенно ответственные узлы собирались и сваривались в аргоновой атмосфере.

Всего на сварочных работах были израсходованы более миллиона кубометров аргона. Отработанный аргон скапливался у пола. Даже почти все крысы в сварочном цехе передохли. Однако и среди крысиного сословия нашлись приспособленцы, которые перебрались на жительство под потолок, где концентрация аргона была не убийственно велика.

Применение в огромных количествах для сварки аргона, который химики получали из воздуха, дало толчок развитию новых технологий. Для получения аргона в промышленных масштабах перерабатывались большие объёмы воздуха, при

этом сопутствующими продуктами являлись азот и кислород. Азот отправлялся для изготовления удобрений, а кислород металлургам для использования в конверторах для производства различных сортов сталей.

В первом же испытательном походе лодка при мощности главной энергетической установки 80 % и расчётных оборотах винтов **разогналась до 42 узлов (77,9 км/час)**.

После того как представитель Кировского завода (Ленинград), изготовителя главного редуктора дал добро, мощность реактора увеличили и лодка понеслась в океане под водой **со скоростью 44,74 узла (82,9 км/час)**. Это был мировой рекорд всех времён и народов. Никто после этого с такой ошеломляющей скоростью для подводного корабля не ходил. До настоящего времени с такой подводной скоростью ни одна лодка мира не ходила.



Рис. 5.27. После рекордного заплыва, [69]

Когда лодка всплыла, чтобы сообщить командованию по радиоканалу об успешном окончании скоростных испытаний, оказалось, что антенна снесена потоком воды. Кроме антенны в пучины были унесены некоторые конструкции: дверь в ограждение рубки, лючки в носовой части и ещё несколько мелких деталей. Антенну установили запасную и шифровку в адрес Л.И. Брежнева передали.

Кстати, при повторном погружении радиоантенну снова снесло, её конструкцию пришлось поменять, придав ей более обтекаемую форму.

В ходе испытаний выяснилось ещё одна, более существенная неприятность. На скоростях более 35 узлов турбулизировался пограничный слой корпуса, с него начинали срывать крупномасштабные вихри, которые создавали высокоинтенсивный шум в широком диапазоне частот. Лодка на высоких скоростях слепла и глохла. В боевой обстановке рекордные скорости были осуществимы только для погони за врагом.

В дальнейших модификациях проекта 661 гидродинамикам удалось понизить уровень собственного гидроакустического шума до приемлемого уровня

Данные испытаний и эксплуатации скоростных лодок пр. 661 и отсутствие мощного авианосного флота сделали необходимым разработку атомной подводной лодки – перехватчика авианосных соединений потенциального противника, способной при водоизмещении 1500 тонн развивать подводную скорость до 40 узлов.

Как известно из гидродинамики, скорость обтекаемого потоком сплошной среды корпуса субмарины определяется, в основном, двумя факторами, смоченной поверхностью и мощностью энергетической установки. Смоченная поверхность определяет силу сопротивления движению, которая наряду с площадью определяется ещё и формой обтекаемого тела, в данном случае, лодки. Изначально, таким образом, ставилась задача втиснуть мощную ядерную энергетическую установку в как можно меньший объём.

Сразу стало ясно, что такие лодки необходимо обслуживать наподобие самолётов перехватчиков, т.е. они должны находиться под присмотром техников в постоянной боевой готовности, экипажи тоже должны находиться поблизости и быть готовыми к выходу на перехват.

Эти требования накладывали специфические требования к конструкции. Лодка приводилась в движение ядерным реактором с жидкометаллическим теплоносителем, как обеспечивающим большие удельные мощности при компактных размерах. Для сокращения экипажа до 15 – 17 человек все системы энергоснабжения, оружия и жизнеобеспечения должны были иметь высокую степень автоматизации.

Скоростную лодку было необходимо снабдить особо прочным корпусом, потому что при движении под водой со скоростью 40 узлов, легко уйти в запредельные глубины в течение короткого промежутка времени.



Рис. 5.28. АПЛ пр. 705 «Ли́ра»

Всем этим требованиям удовлетворяла АПЛ проекта 705, (рис. 5.28) предложенная конструкторским бюро «Малахит» с титановым корпусом водоизмещением 2300 регистровых тонн.

Использование атомной установки БМ-40Ас одним ядерным реактором мощностью 155 МВт с теплоносителем в виде сплава висмута и свинца создава-

ло серьёзные эксплуатационные трудности.

На бумаге, как обычно, все было красиво, а на практике не очень. Дело в том, что жидкометаллический теплоноситель имел температуру кипения 1,679 °С. Это делало необходимым постоянно поддерживать в активной зоне высокие температуры, т.е. реактор должен был работать на минимальной мощности постоянно или был необходим береговой комплекс для обогрева лодок такого типа.

Ко всем прочим эксплуатационным недостаткам добавлялись сложности с эксплуатацией систем автоматики. Флотские специалисты были не готовы управлять такой сложной электроникой, требовались специально подготовленные люди с хорошим фундаментальным образованием.

Лодка была оснащена противолодочными ракетами «Вьюга» для поражения стратегических ракетносцев и высокоскоростной подводной ракетой «Шквал».

По техническому уровню систем 705 проект намного опередил своё время и позволил накопить бесценный опыт, который используется и теперь в XXI в.

Целый ряд технических достижений полученных на лодке этого проекта до настоящего времени не превзойдён мировой практикой судостроения. По натовской классификации эта лодка проходила под кодовым названием «Альфа».

Эта лодка была способна за счёт своих скоростных характеристик и маневренности уходить и уворачиваться от любых вражеских торпед.

На скорости 41 узел (76,1 км/час) могла выполнять циркуляцию на 180° за время, не превышающее 2 мин. Как при воздушных боях истребителей «Ли́ра» могла быстро совершать маневр, оказаться в корме вражеской лодки и произвести торпедную атаку.

Лодки пр. 705 были эстетически совершенны (рис.5.29), отчасти и потому, что гидродинамикой руководила женщина, Калачёва Л.В., под руководством которой впервые в мире ещё в шестидесятые годы прошлого века использовалось полномасштабное компьютерное моделирование корпусов лодок, причём на супер вычислителях отечественного производства типа БСЭМ-10 и «Эльбрус».

Ещё одним замечательным во всех отношениях атомным подводным многоцелевым кораблём стала лодка проекта 971 (рис. 5.30). В конструкции лодки должны были быть учтены все положительные и отрицательные качества предыдущих проектов.

Этот атомоход по документам значился под шифром «Щука – Б», а по натовской классификации «Акула». В самом начале проектирования перед учёными и конструкторами ставилась задача превзойти по показателям американскую многоцелевую лодку третьего поколения проекта «Лос-Анджелес».

К моменту начала проектирования атомохода отечественными металлургами была получена особо прочная сталь, которая позволяла при заданных гидростатических нагрузках использовать более тонкие листы.

Новые разработки Советских учёных, в основном ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова и конструкторов теоретически давали возможность снизить уровень шума в сравнении с прежними образцами в пять раз.

Когда эта лодка проходила ходовые испытания, было установлено, что по уровню шумности «Щука – Б» была тише лучшего американского проекта многоцелевой АПЛ «Лос-Анджелес». В конечном модернизированном варианте лодка получила гидроакустический комплекс с цифровой обработкой сигнала и новую систему управления оружием, предусматривающую наряду с ракетами, минами и торпедами, использование крылатых ракет.

Уровень автоматизации, несмотря на просьбы военных, разработчики выдержали на уровне проекта 705. Лодку снабдили спасательной капсулой, которая прошла успешные испытания в предыдущем проекте.

Все механизмы, создававшие шум в этом проекте были заключены в двойные корпуса с акустической развязкой между ними. При проектировании силовых агрегатов редуктора были впервые в мире использованы конструкции типа «сэн-

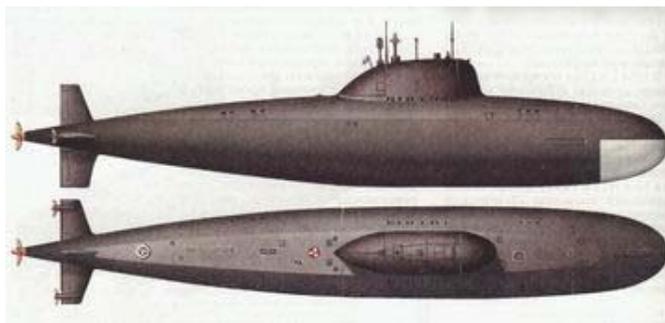


Рис. 5.29. В АПЛ пр. 705 всё служило для достижения большой скорости



Рис. 5.30. АПЛ пр. 971 «Щука – Б»

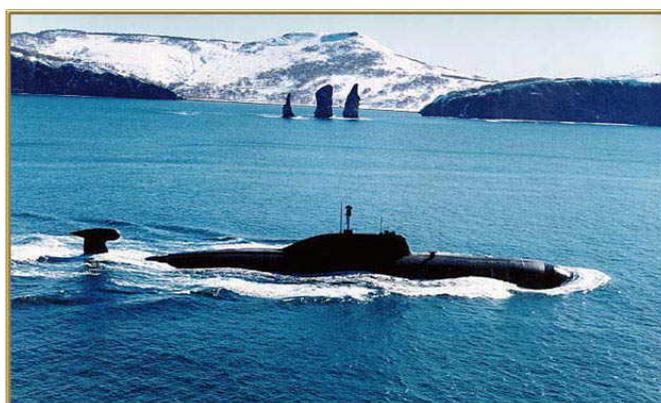


Рис. 5.31. Возвращение «Щуки – Б» из похода

двич», когда зубчатый венец шестерёнок делался из высокопрочной стали, а тело шестерни из мягкого металла с высоким значением виброустойчивости. Конструкция лодки была блочной.

Отдельные блоки изготавливались в цехе до уровня полной готовности, при монтаже в корпусе только подсоединялись кабельные и трубопроводные коммуникации.

Каждый зональный блок имел собственную вибрационную резинокордную пневматическую развязку от корпуса и от соседних блоков. За счёт высокого уровня автоматизации экипаж лодки пришлось сократить до 73 человек из которых офицеров было – 34 человека, у американцев на «Лос-Анджелесе» в составе экипажа числился 141 человек.

На лодке размещался проверенный временем надёжный водо-водяной ядерный реактор ОК-650Б мощностью 190 МВт с четырьмя парогенераторами и одной одновальной турбиной с мощностью на валу 50 000 л.с. 971 проект имел малошумный винт большого диаметра с семью лопастями и уменьшенной частотой вращения.

В случае аварии на главной двигательной установке были предусмотрены аварийные источники электроэнергии и вспомогательные средства движения: подруливающие устройства с электроприводом, питаемом аккумуляторами. Аккумуляторы подзаряжались двумя дизель-генераторами ДГ-300 мощностью по 750 л.с. каждый, с запасом топлива на 10 суток. В аварийном режиме лодка могла двигаться в надводном положении со скоростью 5 узлов.

В состав гидроакустического комплекса МГК-5903 «Скат-КС» входила основная носовая антенна, две боковые антенны большой протяжённости, способные формировать узкую диаграмму направленности на низких частотах и обладающие высокой чувствительностью в широком диапазоне частот.

Комплекс в своём составе имел аппаратуру для измерения в реальном масштабе времени фазовой скорости звука, не имеющую мировых аналогов. По изменению фазовой скорости обнаруживались кильватерные следы подводных лодок, прошедших в этом районе.

В кильватерном турбулентном следе любой лодки ввиду высокоинтенсивной мелкомасштабной турбулентности, содержащиеся в воде растворённые газы, переходят в свободное состояние в виде мельчайших пузырьков, которые могут по не вполне понятным причинам сохраняться в течение нескольких суток. Эти микрополости являются причиной изменения фазовой скорости звука, которая и обнаруживалась комплексом.



Рис. 5.32. Ракето-торпеда «Шквал»

На подводной лодке установлен навигационный комплекс «Медведица – 971» и комплекс радиосвязи «Молния – М» с системой космической связи «Симфония».

Одной из многочисленных особенностей лодки было новейшее вооружение, в частности, ракетоторпедой «Шквал» (рис. 5.32). Изделие имеет диаметр 533,5 мм, длину 8 200 мм, массу 660 кг максимальную дальность хода 11 км **при скорости 200 узлов или 371 км/час (!!!)**.

«Шквал» не требовал специальных шахт, изделие выбрасывалась из обычного торпедного аппарата, достигала заданной глубины, после чего включались ракетные двигатели.

Схема работы ракето-торпеды состояла в следующем. После того как лодка – носитель обнаруживала вражеской субмарину, в автоматическом режиме производилась обработка полученных гидроакустических данных и они вводились в бортовой навигационный комплекс ракето-торпеды. Изделие выбрасывалось из штатного торпедного аппарата, после достижения заданной глубины включался ракетный двигатель.

Беспрецедентные скорости движения под водой стали возможны благодаря использованию целого комплекса уникальных разработок отечественных учёных и конструкторов.

До настоящего времени, хотя изделие уже более 30 лет стоит на вооружении, **ни в одной стране мира с такими высокими скоростями изделия под водой не ходят.**

Ракето-торпеда «Шквал» движется в суперкаверне (воздушной полости обтекаемой формы) на границы которой через специальные сопла (рис. 5.33) подаётся раствор специального полимера, который «смазывает» поверхность каверны, существенно снижая гидродинамическое сопротивление.

Изделие было принято на вооружение в 1977 г. Долгое время Пентагон информацию о «Шквале» был склонен рассматривать как типичную «дезу», т.к. американские специалисты считали, что под водой достичь скоростей 100 м/с принципиально не возможно.

Отечественными учёными такая задача была решена и воплощена в грозное «железо» с прямоточным гидрореактивным, не имеющем аналогов, двигателем с уникальным топливом использующем в качестве рабочего тела забортную воду, а в качестве окислителя – гидрореагирующий металл.

Кавитирующая ракето-торпеда «Шквал» оказалась весьма эффективной, потому, что могла в короткие сроки доставить боевой заряд на достаточно большое расстояние. Изделие было очень трудно засекал гидроакустическими средствами и ещё сложнее избегать с ним встречи. Кроме «Шквала» лодки проекта 971 вооружались крылатыми ракетами «Гранат», самотранспортирующимися и обычными минами, а так же ракето-торпедами «Водопад» и «Вктер».

Проект постоянно совершенствовался. В 1996 г. в Северодвинске была построена лодка новой модификации «Вепрь», которой натовцы присвоили шифр «Акула-2». Потом появилась лодка «Барс» (рис. 5.34), которая ввиду технологических усовершенствований, в частности, системами активного виброгашения, стала ещё менее шумной, сравнявшись с самой совершенной американской лодкой четвёртого поколения «Сивулф».

На малых подводных ходах, порядка 5 – 7 узлов в Мировом океане отечественные лодки подобные «Барсу» современными гидроакустическими средствами не обнаруживаются. Это данные американских аналитиков.

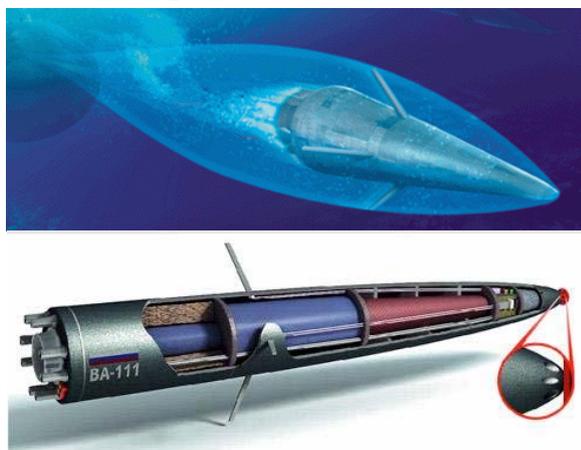


Рис. 5.33. Движение в суперкаверне



Рис. 5.34. АПЛ проекта 971 «Барс»

По поводу лодок проекта 971 в американском конгрессе состоялись слушания, на которых в частности сообщалось: «Появление подводных лодок типа Akula, а также других русских АПЛ третьего поколения продемонстрировало, что советские кораблестроители ликвидировали разрыв в уровне шумности быстрее, чем ожидалось».

Американскими специалистами было признано, что на оперативных скоростях порядка 5 – 7 узлов шумность лодок Improved Akula, фиксировавшаяся средствами гидроакустической разведки, была меньше шумности самых продвинутых АПЛ ВМС США.

На обсуждение американских законодателей во времена перестройки и после неё неоднократно выносились предложения, могущих, по мнению военных, решить проблему американского паритета. В частности, предлагалось:

1. Потребовать от правительства России придать полной гласности свои долгосрочные программы в области подводного кораблестроения;
2. Установить для России и США согласованные ограничения на количество и состав многоцелевых АПЛ;
3. Оказать нашему государству экономическую помощь по переориентированию судостроительных военных верфей на выпуск гражданской продукции;

Обсуждаемые в американском конгрессе вопросы подтверждают высочайший уровень отечественных военно-морских разработок. Международный «Гринпис» тоже озаботился нашими АПЛ и всюду выступают за экономические санкции в случае продолжения строительства АПЛ. Ни немецкие, ни французские, ни английские, ни норвежские, а именно наши почему-то наиболее беспокоят глобальных экологов. Странно.



Рис. 5.35. АПЛ «Дмитрий Донской»

Несколько слов необходимо сказать о последних достижениях в атомном отечественном судостроении. В сентябре 1980 г. была спущена на воду атомная лодка с 24 баллистическими ракетами, каждая из которых должна была весить почти 100 тонн. Лодка имела длину в два футбольных поля и высоту девятиэтажного дома, водоизмещение 50 000 регистровых тонн.

Эта лодка была занесена в книгу рекордов Гиннеса, как самая большая лодка мира. Под-

водная лодка этой серии на испытаниях показала надводную скорость 12 узлов (23 км/час) и в подводном положении 27 узлов (50 км/час).

Рабочая глубина погружения лодки – 400 м, автономность плавания – 180 суток, экипаж 162 человека, в том числе 52 офицера. Наибольшая длина – 172 м, наибольшая ширина корпуса – 23,3 м. Силовая установка лодки состоит из двух водо-водяных реакторов ОК-650, обработанных на атомных ледоколах серии «Сибирь».

АПЛ проекта 941 последней модификации созданы по оригинальной, опять-таки не имеющей аналогов в мировой практике схеме катамаранного типа.

Лодка состоит из двух независимых корпусов, расположенных параллельно, что позволило увеличить живучесть и условия обитаемости. Внутри лёгкого корпуса, покрытого противогидроакустическим покрытием, расположены пять прочных титановых обитаемых отсеков, из которых два – главные.

Наибольший диаметр отсеков – 10 м. Конструкция корпуса позволяет всплывать лодке в северных шротах с толщиной ледяного покрова 2,5 м.

Лодка с такими параметрами в северных морях становится практически неуязвимой для авиации противника. Судно несёт 20 баллистических ракет «Булава», восемь комплексов ПЗРК «Игла».

На лодке имеется шесть торпедных аппаратов, позволяющие использовать как обычные торпеды, так и ракето-торпеды «Шквал» и их дальнейшую модификацию.

АПЛ «Дмитрий Донской» и собратья по серии, разработанные в лучших традициях отечественного подводного судостроения являются надёжной сдерживающей силой мирового масштаба, позволяющей несмотря на внутренние экономические неурядицы сохранять статус самостоятельного государства и влиять на мировую политику.



Рис. 5.36. АПЛ проекта 941и старт «Булавы»

6. Атомное оружие

6.1. Начало

Довоенный период развития ядерных исследований. Приступая к рассмотрению применения достижений атомной и ядерной физики в военных целях, напомним основные этапы освоения самой эффективной и разрушительной энергии нашего времени, так сказать, квинтэссенция энергетических возможностей человечества.

Первые открытия в области структурного строения материи никоим образом не связывались с практическим использованием. Решались, как тогда казалось, вполне академические задачи исключительно фундаментального значения.

Работы, в большинстве своём, носили отвлечённый характер и были направлены на поиск закономерностей микромира.

Только в тридцатых годах прошлого века начала прорисовываться перспектива энергетического использования развиваемых в лабораториях работ. Первым кто провёл оценочные энергетические расчеты, был Эрнст Резерфорд. Провёл и ужаснулся.

Ужаснулся порядкам величин энергии, высвобождаемой при делении атомного ядра. Его ужас не остановил исследования, а только прибавил азарта и прыти. Началась гонка. Но обо всём по порядку.



Рис. 6.1. Образец соли урана

Как уже отмечалось в предыдущих разделах, началом атомно-ядерной эры в физике принято считать 23 ноября 1896 г., когда Анри Беккерель во Франции сделал сообщение в Академии наук, об обнаруженных им по стечению обстоятельств весьма необычных свойствах соли урана (рис.6.1).

Надо сказать, что все значимые энергетические события начинались с открытия каких-то странных свойств обычных веществ.

Фалес Милетский, например, обнаружив, что натёртая кожей янтарная палочка начинает обладать некими совершенно не типичными свойствами, стал родоначальником электростатики, которая, в свою очередь, обусловила появление на научной арене учения об электрических явлениях.

Интересно, что по началу электрические явления тоже никто не связывал с какими-то практическими применениями. Шибали электрическим зарядом монахов и мушкетёров, поджигали искрой ватку, смоченную в эфире, умерщвляли птичек и грызунов. Баловались, одним словом. А вон что получилось из этих забав. Электромагнитная энергия во всём своём многообразии стала одной из основ современной цивилизации.

Беккерель, подобно Фалесу Милетскому, обнаружил, что обыкновенная соль урана оказывает на эмульсию фотопластинки, завернутую в светонепроницаемую бумагу, такое же действие как лучи, открытые Конрадом Рентгеном.

Но! Лучи Рентгена получались в специально созданном электрическом аппарате, а у Беккереля исходили из химического вещества. Сообщение Беккереля было встречено коллегами с неподдельным интересом.

Многие учёные начали повторять нехитрые эксперименты профессора – химика, благо, что сложной аппаратуры для этого не требовалось. Научная общественность, буквально завелась в предчувствии чего-то необыкновенно интересного. Широким фронтом развернулись исследования явления, названного Марией Кюри – радиоактивностью.

Склодовская, уроженка Варшавы, окончила в Париже знаменитую Сорбонну и, будучи женой молодого французского физика Пьера Кюри, работала в лаборатории института Физики и Химии французской Академии наук. Повторив опыты Беккереля, Кюри обнаружила, что излучение является следствием необычных свойств урана.

Кроме того, ею было установлено, что образцы урановых соединений с разных карьеров обладают различной радиоактивностью и что в них присутствует ещё одно радиоактивное вещество. Это, ранее неизвестное науке вещество было получено супругами Кюри и названо **радием**. Радиоактивность радия в примерно 1000 раз превосходила радиоактивность урановых соединений.

Пьер Кюри, следуя по накатанной Дж. Дж. Томсоном дорожке, пропустил излучение Радия в магнитном поле и обнаружил, что оно распадается на три составляющих: одна его часть, β – излучение, представляет собой поток отрицательно заряженных электронов, вторая – дважды ионизированные атомы гелия α – частицы, третья составляющая никакой реакции на магнитное поле, впрочем, так же как и на электрическое поле не проявляла, это были γ – лучи.

Проникающая способность у этих трёх излучений была разной. Проще всего было остановить β – излучение, они с трудом преодолевали лист обычной бумаги, α – лучи, остановить можно было тонкой металлической фольгой, а для γ – излучения даже металлические пластины в несколько миллиметров толщиной не являлись преградой.

Марии Кюри удалось выделить радий в количествах, достаточных для определения его атомного веса. В последствии производство радия достигло масштабов, достаточных для распространения нового радиоактивного вещества по другим лабораториям.

В 1926 г. Мария Кюри становится почётным членом Академии наук СССР. Исследованием радия Мария Кюри занималась по незнанию, не соблюдая элементарных мер защиты от излучения, скончалась от лейкемии. Это была, наверное, первая, но далеко не последняя жертва, принесённая родом человеческим новому источнику превосходства над Природой, промежуточному финалу энергетической гонки.

В 1911 г. Эрнст Резерфорд исследуя по заданию своего именитого учителя Дж. Дж. Томсона достоверность модели атома, обнаружил, бомбардируя α – частицами золотую фольгу, открыл атомное ядро и предложил планетарную модель атома.

Это была гипотеза, не подтверждённая экспериментально, но сыгравшая большую роль в выборе дальнейшего направления исследований. Уже в 1919 г. Резерфорд в своей кембриджской лаборатории осуществил первую в Мите ядерную реакцию.

Бомбардируя ядра азота α – частицами, он превратил их в ядра кислорода. Сбылась вековая мечта алхимиков трансформировать в лаборатории химические элементы, превращая ртуть и свинец в золото.

Опыты Резерфорда показали, что атом делим, при определённых условиях ядра азота распадались на ядра кислорода. Опыты по расщеплению атомных ядер продолжались во многих лабораториях, накапливался бесценный опыт проникновения в глубь материи.



Рис. 6.2. Джеймс Чедвик

Следующим важным шагом в теории атомного ядра стало открытие учеником Резерфорда Джеймсом Чедвиком (рис. 6.2) нейтрона, существование которого было предсказано гениальным учителем. Нейтроны в ядерной теории, помимо объяснения наличия в природе изотопов, стали предтечей цепной ядерной реакции.

В 1936 г. отличились итальянцы. Группа физиков, возглавляемая Энрико Ферми, обнаружила, что если нейтроны пропускать через слои воды и парафина, то они теряют свою скорость, превращаясь в медленные нейтроны, которые легче захватываются ядрами. Это открытие в дальнейшем использовалось для организации управляемых ядерных реакций.



Рис. 6.3. Ирен и Фредерик Кюри

Французские физики Ирен и Фредерик Кюри (рис. 6.3) в 1934 г. открыли явление наведённой радиоактивности. Учёные облучали алюминиевую фольгу радием, после чего алюминий становился радиоактивным.

Новость была не из приятных. Вышло, что вещества находящиеся поблизости нейтронного облучения приобретали радиоактивные свойства.

Другими словами, всё что находилось рядом с ядерными экспериментами становилось опасным для живых организмов. Впервые стал обсуждаться вопрос о биологической защите сотрудников ядерных лабораторий.

Годом позже, Артур Демпстер поведал миру о двух радиоактивных изотопах урана: U^{235} и U^{238} , причём в природном уране превалирует U^{238} , а концентрация U^{235} составляет только 0,7%.

В 1938 г. немецкие физики Отто Ганн и Фриц Штрассман открыли расщепление ядер урана при бомбардировке их медленными нейтронами. Ядра урана превращались в ядра бария, которые были в два раза легче ядер урана.

Возникал вопрос – куда девалась масса? Вот тут-то и всплыла формула гениального Оливера Хевисайда, разрекламированная впоследствии гением всех стран и одного народа А. Эйнштейном $E = mc^2$.

Когда учёные соотнести потерянную массу с энергией, то подтвердилось ещё одно пророчество Резерфорда о фантастическом энергетическом превосходстве ядерных реакций над аналогичными химическими процессами.

Советские исследователи Георгий Флёров и Лев Русинов 10 апреля 1939 г. в результате своих экспериментов обнаружили, что при расщеплении ядер урана медленными нейтронами распад материнского ядра сопровождается генерированием до трёх новых нейтронов.

Буквально через 12 дней аналогичные результаты были получены Жюлио-Кюри. В самом начале 1940 г. Георгий Флёрв и Константин Петржак обнаружили спонтанное деление ядер урана.

Для предотвращения влияния на процесс деления космического излучения эксперименты проводились под землёй в московском метро. Явление спонтанного деления было использовано в последствии при конструировании атомных бомб, потому что вносило ощутимый вклад в развитие неуправляемой ядерной цепной реакции.

Отечественным учёным – ядерщикам, впрочем, как и их зарубежным коллегам стало ясно, что для получения неуправляемой цепной реакции нужна некая критическая масса урана U^{235} и достаточно интенсивный источник нейтронов.

Первоначальные нейтроны расщепят ядра урана, которые в процессе сгенерируют вторичные нейтроны, способные вывести из равновесного состояния новые ядра урана. Процесс, по мнению исследователей, должен нарастать лавинообразно, т.е. должен произойти взрыв.

Можно считать, что к 1940 г. идея атомной бомбы в теоретическом плане созрела, впрочем, как и организации управляемой реакции с использованием поглотителей нейтронов для регулирования и остановки процесса деления.

Но это были чисто теоретические представления, так сказать, идеи о возможностях. Однако все физики давали себе отчёт в том, что техническая реализация намерений будет выливаться в организацию совершенно новых технологий и отраслей промышленности.

Вместе с тем, к моменту начала войны в Европе все страны, занимающиеся ядерными исследованиями, резко прекратили открытые публикации на эту тему.

Работы в Германии, Англии, США и СССР были засекречены. Начиналась новая фаза ядерных исследований. Следует заметить, что в довоенный период успехи американских учёных в ядерной физике были более чем скромные.

Европейские и отечественные центры ядерных исследователей намного опережали. Но, как показал дальнейший ход событий, при соответствующей государственной поддержке можно не только всех догнать, но и перегнать, были бы деньги и желание.

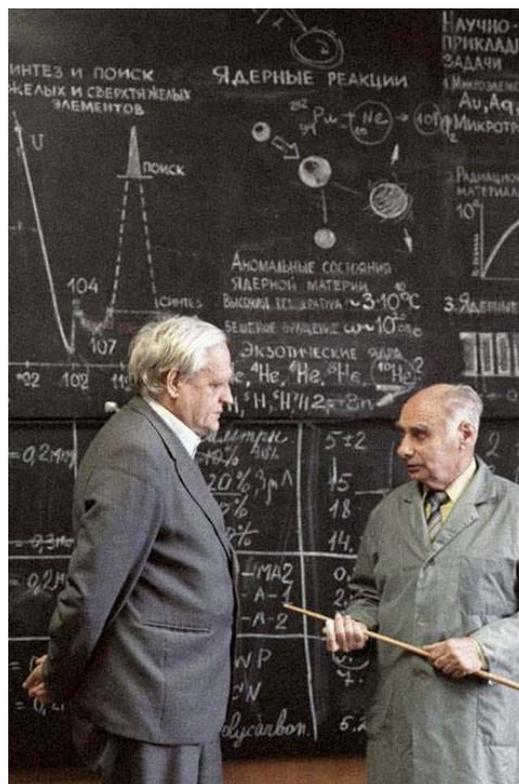


Рис. 6.4. Георгий Николаевич Флёрв (справа)



Рис. 6.5. Лев Русинв

Довоенное состояние отечественной науки. В 1916 г. Россия располагала всего 5 научно-исследовательскими лабораториями, однако в самый разгар Гражданской войны в Петрограде по инициативе учёных, поддержанной новой властью, был открыт институт рентгенологии и радиологии по руководством М.И. Неймёнова. В 1922 г. был открыт радиевый институт АР СССР который возглавил Д.И. Вернадский. В этом же году был основан Петроградский физико-технический институт, в дальнейшем ЛФТИ, его директором до 1950 г. был Абрам Фёдорович Иофе. Иофе был учеником Рентгена, но после первой революции он вернулся на Родину. В 1919 г. по инициативе Н.Е. Жуковского был организован знаменитый ЦАГИ (центральный аэрогидродинамический институт). В 1919 г. организовался Государственный оптический институт, в котором проводились исследования по спектроскопии атомов.

После революции и гражданской войны положение в стране было чрезвычайно тяжёлым, не хватало всего, включая продовольствие. В декабре 1919 г. правитель-

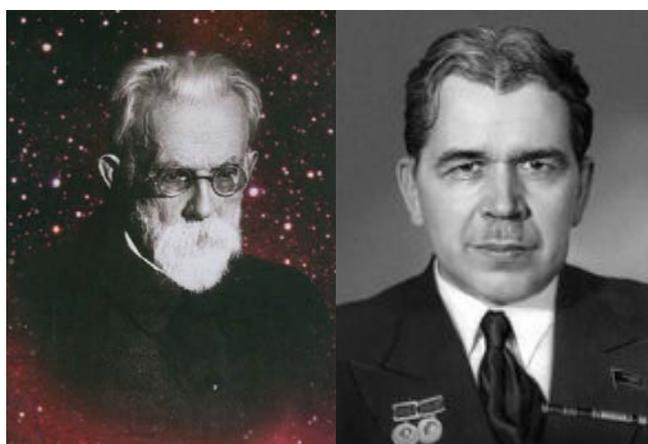


Рис. 6.6. Вернадский В.И., Вавилов С.И.

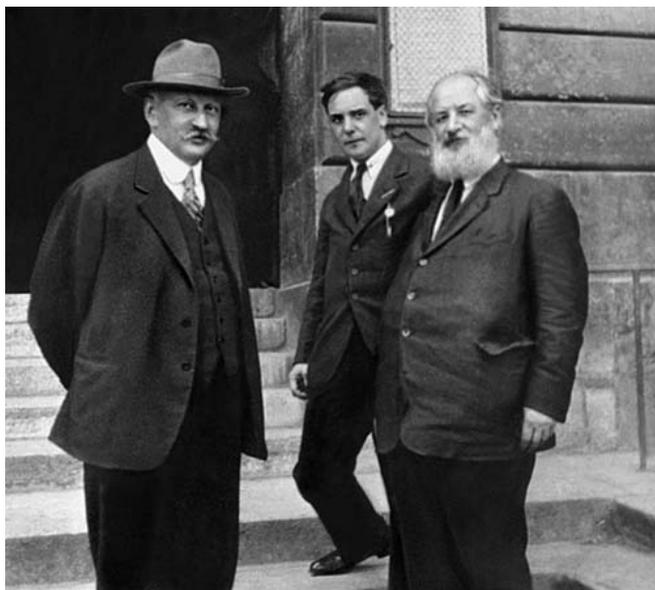


Рис. 6.7. А.Ф. Иофе, П.Л. Капица, А.Н. Крылов

Следует отметить жест великодушия Резерфорда, который ходатайствовал перед правительством Англии о продаже. Вскоре после начала работ лаборатории в

стве специальным постановлением предписало выделять ведущим учёным страны дополнительные продовольственные пайки, которые были в два раза больше обычных академических пайков.

Несмотря на валютные трудности в 1921 г. А.Ф. Иофе был на пол года командирован в Германию и Англию для закупки необходимого учёным лабораторного оборудования.

Иофе встречался с Резерфордом. Помимо обсуждения научных проблем был решён вопрос о командировании в Кембридж молодого учёного Петра Леонидовича Капицы, который проработал с классиком в общей сложности 13 лет.

После возвращения в 1934 г. в Москву Капица организовал Институт физических проблем. Правительство нашло возможность закупить в Англии всё оборудование лаборатории низких температур, в которой работал Капица в Кембридже.

Москве был предложен способ промышленно сжижения кислорода, в котором испытывала потребность промышленность государства.

После избрания А.Ф. Иофе в 1920 г. действительным членом Российской академии наук он занялся созданием новых физических исследовательских центров в Москве, Ленинграде, и на Украине, в Харькове и Днепропетровске. С 1918 по 1936 гг. на базе ЛФТИ были развернуты и начали активно работать 14 научно-исследовательских институтов, в которых работало более 1000 научных сотрудников.

В середине тридцатых годов прошлого века СССР на научные исследования тратил больше бюджетных средств, чем США. Оно и понятно, чтобы быть на уровне, нужно было догонять, т.е. наращивать темпы, а это требовало вложений.

В отечественной атомной науке работали талантливые молодые учёные: Пётр Леонидович Капица, Николай Николаевич Семёнов, Георгий Николаевич Флеров, Игорь Васильевич Курчатов, Дмитрий Владимирович Скобельцин, Виталий Георгиевич Хлопин, Анатолий Петрович Александров и многие другие, ставшие в последствии знаменитыми в узких кругах, потому что ввиду специфики решаемых задач их фамилии и научные достижения не доводились до сведения современников.

Игорь Васильевич Курчатов пришёл в ЛФТИ после окончания Крымского университета и в первые же годы работы показал себя, как талантливый учёный и умелый организатор. В 1933 г. по собственной инициативе он изготовил небольшой ускоритель элементарных частиц (циклотрон) и занялся исследованием искусственной радиоактивности вместе с Флёровым, Русиновым, Петржаком и Никитской.

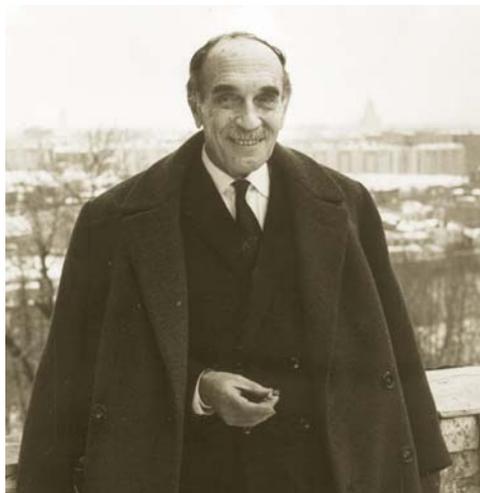


Рис. 6.8. Семёнов Н.Н.

На базе ЛФТИ осенью 1933 г. была проведена первая Всесоюзная конференция по атомному ядру на которой отечественные учёные обменялись своими мнениями по проблемным вопросам исследований.

Конференция показала, что отечественная ядерная физика, особенно в теоретическом плане, находится на уровне передовых международных достижений в этой области. В 1934 г. Н.Н. Семёнов опубликовал книгу, посвящённую цепным реакциям. В последствии он за эту работу был удостоен Нобелевской премии.

Под руководством И.В. Курчатова было открыто и теоретически описано явление захвата нейтрона протоном.

В 1937 г. Курчатов становится заведующим кафедрой экспериментальной физики ЛФТИ и организует вторую Всесоюзную конференцию по проблемам атомного ядра. К этому времени число учёных, занимающихся атомной физикой, выросло в стране в 5 раз. В 1939 г. в ЛФТИ началось строительство самого мощного на то время в Европе циклотрона, который предполагалось ввести в эксплуатацию в начале 1942 г.

Европа уже была покорена фашистской Германией, все осознавали, что, несмотря на договоренности, война стоит на пороге. Многие дела, включая ядерные, пришлось отложить до лучших времён.

Ядерная программа США. Северная Америка не почувствовала войну до 7 декабря 1941 г. Война заявила о себе после гибели значительной части Тихоокеанского флота США в Перл-Харборе, когда 360 японских самолётов за два часа размолотили один из современных флотов мира.

Четыре линейных корабля были потоплены вчистую, остальные значительно повреждены. Поскольку США и в те времена была одной из богатейших стран мира не с лучшей системой образования, то быстро нарастить научные мускулы можно было только за счёт приглашения учёных и специалистов из Европы.

Умело воспользовавшись военной ситуацией американцы, не жалея денег, в короткий срок смогли собрать у себя известных европейских учёных, связанных с атомной и ядерной физикой. В первые годы войны в США перебрались: датчанин Нильс Бор и Самуэль Гоудсмит; итальянцы Энрико Ферми, Эмилио Сегре и Бруно Понтекорово; венгры Лео Сциллард и Эдвард Тейлер; немцы Пётр Дебай, Клаус Фукс; австриец Вейскопф.

Многие учёные пережившие нашествие фашизма в своих странах отчётливо представляли, что в Европе даже теоретически не просматривается такой силы, которая смогла бы противостоять немецкой экспансии. Надежды, по большому счёту, возлагались только на СССР и США.

Советский Союз был закрытой страной, попадать туда было сложно, да и желающих перемещаться в воюющую страну не было. Личное благополучие превалировало над желанием помочь страдающему человечеству.

Учёным, занимающимся атомной физикой было известно, что в планах Гитлера было создание атомной бомбы, поэтому была организована кампания по заинтересованности правительства США в форсировании работ по исследованиям в области разработки атомного оружия.

Венгерский физик Лео Сциллард стал инициатором подготовки письма президенту США. Было решено, что письмо должен подписать Альберт Эйнштейн, раскрученный к тому времени по полной программе.

И такое письмо 2 августа 1939 г. легло на стол Ф.Д. Рузвельту. В частности в нём говорилось: «Сэр, работа, проделанная Э. Ферми и Л. Сциллардом дает основание считать, что элемент уран может стать в самом ближайшем будущем новым и важным источником энергии будут созданы бомбы нового типа чрезвычайно большой мощности».

Конкретных указаний на создание нового оружия со стороны правительства не последовало, однако был создан урановый комитет и Энрико Ферми был выделен уран и графит для постановки новых опытов по управляемой термоядерной реакции.

Это, по мнению ученых, была полумера, и они обратились к президенту со вторым письмом. А в это время война набирала не шуточные обороты. По стечению обстоятельств, буквально за день до нападения на Перл-Харбор было принято решение о выделении достаточно крупной суммы на атомную программу.

В Калифорнийском университете в Беркли в атомной лаборатории физиками Сегре, Валем, Кеннеди и Сиборга был открыт и выделен давно предсказанный теоретически трансурановый искусственный химический элемент – плутоний, Pu^{239} , образец которого можно было наблюдать только с помощью микроскопа.

Это событие произошло на мощном по тем временам циклотроне при бомбардировке ядер урана ядрами водорода – дейтронами.

Плутоний по своим свойствам в плане дальнейшего использования в атомном проекте был аналогичным урану и по теоретическим представлениям, развитым Ферми, мог получаться не в циклотроне, а в ядерном реакторе.

В октябре 1942 г. в Металлургической лаборатории Чикагского университета под трибунами действующего университетского стадиона началось строительство первого в мире ядерного реактора, где вскоре коллектив исследователей под руководством Энрико Ферми получили первую в мире управляемую цепную реакцию деления ядер урана медленными нейтронами.

В результате этой реакции получался плутоний. Путь промышленного получения плутония в необходимых для создания бомбы количествах, был открыт. К этому времени учёные уже смогли объяснить генералам и адмиралам все открывающиеся перспективы боевого применения радиоактивных веществ.

Президент США 17 июня 1942 г. утвердил проект создания атомной бомбы и предписал военным курировать проект, который вскорости получил кодовое название «Манхэттенский проект».

Возглавлять это грандиозное мероприятие стал генерал Лесли Гровс, командующий инженерно-строительными войсками. Кстати, именно под руководством Гровса было построено известное теперь всему миру здание Пентагона. Научным руководителем проекта был назначен Роберт Оппенгеймер. К осуществлению проекта, в общей сложности, было подключено более 150 тысяч специалистов разного профиля.

«Манхэттенский проект» был непосредственно подчинён президенту через военного министра. Из соображений сохранения режима строжайшей секретности финансирование проекта шло в обход Конгресса США.

Изначальная стоимость проекта учёными и военными была рассчитана на 100 миллионов долларов. Однако реальные затраты на реализацию программы вылились в 2 миллиарда долларов. Такая ошибка в оценках затрат не является удивительной, потому что затеваемое мероприятие в деталях было ещё не до конца не известно даже в теоретическом плане, не говоря уже о бесчисленных моментах технической и технологической реализации.

Кто мог себе представить, что для строительства плутониевого завода потребуются привлечь более 45 тысяч инженеров и строителей. Для получения конечного продукта – атомной бомбы, первоначально планировалось строительство реакторов для производства плутония, нескольких заводов для обогащения урана и предприятий по изготовлению собственно оружия.

Все эти вновь вводимые промышленные объекты требовали энергообеспечения, расселения работников и снабжения их всем необходимым. Плюс железные и автомобильные дороги, плюс огромный штат военной полиции и войск специального назначения для поддержания режима секретности и кадровой работы.

Были запущены практически одновременно три ядерных реактора по производству плутония, территории под их строительство правительству пришлось выкупать у владельцев земель, которые огораживались заборами, а это площади по 2000 км², и на них вводился особый режим пребывания работников.

Первый реактор был пущен в 1942 г. Из каждых 10 ядер урана U^{235} получалось 9 ядер плутония Pu^{239} . После трёхмесячной работы реактора плутониевые стержни извлекались, выдерживались в течение месяца для сбрасывания радиоактивности до приемлемого уровня, затем в автоматизированных цехах с биологической защитой проводились дальнейшие манипуляции.

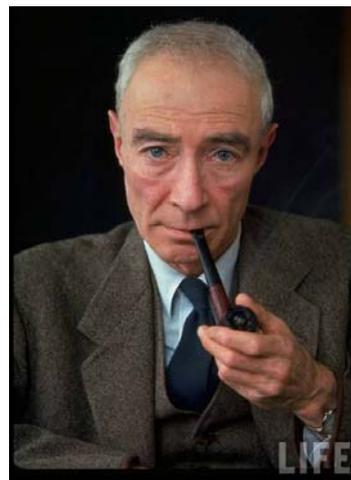


Рис. 6.9. Роберт Оппенгеймер

В этом же году были запущены второй и третий реакторы. Параллельно на химических обогатительных комбинатах шли работы по выделению из природного урана изотопа U^{235} . Для этих работ в штате Теннесси в рекордно короткие сроки был построен и запущен в феврале 1943 г. химический комбинат, который стал выдавать первый обогащённый уран.

На предприятиях реализовывался магнитный способ разделения изотопов. Предприятие было в высшей степени затратным, обмотки электромагнитов для сокращения потерь на сопротивление изготавливались из серебряной проволоки. Правительством США по этому случаю было принято решение о выделении 14 тонн серебра из государственных стратегических запасов.

Несмотря на многочисленные технические трудности 24 июля 1945 г. Было получено достаточное для создания бомбы количество урана, который был переправлен в другой конец страны, в Лос-Аламос, где происходило конструирование и производство бомб. Это было самое наукоёмкое производство всех времён и народов.

К теоретическому обеспечению производства были привлечены мировые звёзды атомной науки, такие как Роберт Оппенгеймер, Нильс Бор, Джеймс Чедвик, Энрико Ферми и многие другие не менее известные в настоящее время имена.

Решалась невиданно сложная научно-техническая задача. Чтобы получить критическую массу взрывчатого вещества требовалось с высокой степенью синхронизма привести в соприкосновение несколько блоков реагирующего вещества, нужно было одновременно взорвать заряды, которые бы синхронно привели в соприкосновение блоки.

Для одной бомбы требовалось около тонны взрывчатого вещества. Определение критической массы радиоактивного вещества U^{235} производили примитивным способом. На столе устанавливались две полусферы, которые постепенно в ручную сближались, при этом контролировали поток возникающих нейтронов.

В одном из опытов реакция деления развилась очень бурно, эксперимент прекратили, но оператор получил смертельную дозу излучения и на десятый день после проведения рокового эксперимента умер. В те легендарные времена отношение к радиации было более чем легкомысленное, в связи, с чем многие исследователи хватали дозы, как сивка блох часто с летальным исходом.

Первым оказался готовым к испытаниям плутониевый заряд, который успешно взорвали 16 июля 1945 г. южнее Лос-Аламоса в пустыне Аламогордо. Операция получила кодовое название «Троица». Несмотря на такое вопиющее святотатство, создатели не были испепелены гневом Всевышнего, а пребывали в весьма приподнятом настроении по случаю результатов, превзошедших все ожидания учёных и инженеров. Человек исполнял своё главное предназначение – преобразователя энергии. В его руках оказался источник энергии невиданных масштабов, способный реально в короткое время покончить со всем человечеством.

Состояние Советской программы в довоенный и военный периоды.

Тематика работ всех Светских научно исследовательских институтов была скорректирована, исходя из оборонных нужд. Так, например, в первые дни войны Курчатов пошёл с заявлением в военкомат с просьбой отправить его на фронт.

Заявление отклонили, но назначили его руководителем группы по разработке методов и средств размагничивания корпусов кораблей и судов.

Дело в том, что буквально в первые часы войны немецкие тральщики завалили фарватеры на Балтийском и Чёрном море магнитными минами, которые реагировали на магнитные поля судов. Группа Курчатова в короткий срок разработала аппаратуру и методики по размагничиванию. Разработки были внедрены на флотах и позволили избежать подрывов кораблей на немецких минах. За эту научную разработку, внедрённую в условиях боевых действий, И.В. Курчатову была присуждена Сталинская премия первой степени.

Пока Курчатов мотался между Балтийским и Чёрным морем, решая вопросы размагничивания, его ученик, лейтенант Флёров в качестве техника обслуживал пикирующие бомбардировщики ПЕ-2.

В декабре 1941 г. в письме с фронта своему учителю Курчатову лейтенант Флёров прислал, сделанный собственной рукой эскиз атомной бомбы с краткими пояснениями.

Устройство бомбы было точно таким, как у американцев, сбросивших её на Хиросиму. В цилиндрическом стволе с толстыми стенками помещались две урановые (U^{235}) полусферы, одна из которых была неподвижной, а вторая подвижная, она приводилась в соприкосновение с первой полусферой посредством взрывчатого вещества. Это был 1941 г. До первого эскиза американской бомбы было ещё далеко.

Понимая лучше других перспективы изобретённого, по сути отечественного варианта атомного заряда, фронтовик Флёров обратился с письмом к И.В. Сталину о необходимости безотлагательного продолжения работ по урановому проекту.

Но в это время немцы были уже под Москвой, грозили блокадой Ленинграду. Вполне естественно, что лейтенанту Флёрову из ставки Верховного главнокомандующего ничего не ответили, но, судя по косвенным признакам, Сталин читал это письмо, потому что в самый разгар Сталинградской битвы Сталин распорядился собрать в Москве А.Ф. Иофе, П.Л. Капицу, В.Г. Хлопонина, В.И. Вернадского для совещания по вопросам ядерных исследований.

Именитые академики не взяли на себя ответственность возглавить атомный проект СССР. Времена были суровые, за невыполнение заданий наказывали строго, вплоть до

Официальная наука рекомендовала на эту должность И.В. Курчатова. Когда прозвучала эта фамилия, Сталин спросил: «Почему я не знаю такого академика?» Пришлось объяснять, что он вовсе не академик, а только профессор, но очень способный.

Сталин был не очень доволен разговором, но в августе 1942 г. в Москву вызвали Флёрова, а в 22 октября в Кремль вызвали и Курчатова для назначения руководителем ядерных исследований. Всё это было в феврале 1943 г. Решение ГКО о создании центра ядерных исследований, закамуфлированное под кодовым названием «Лаборатория №2» при Академии наук СССР, вступило в действие 10 марта всё того же 1943 г.

Таким образом, в тяжелейшее для страны время невиданной по масштабам и жестокости войны правительством СССР были приняты следующие основополагающие будущность атомной судьбы страны решения:

- На пятый день войны, несмотря на пропагандистскую шумиху началась планомерная эвакуация наиболее ценного научного оборудования и персонала в глубь страны;
- Проведение победоносной операции с символическим кодовым названием «Уран» под Сталинградом;
- Возобновление в самый накал военных страстей работ по урановой проблеме;
- Создание в 1943 г. под руководством И.В. Курчатова лаборатории ядерных исследований, «Лаборатории №2».

После назначения Курчатова руководителем «Лаборатории №2» с ним встретился Вячеслав Михайлович Молотов и передал материалы внешней разведки из США, Англии, Германии, касающиеся данных о работах по атомному оружию.

Материалов было много, Курчатова с ними знакомился несколько дней. Конечно, доблестные Советские чекисты были, в большинстве своем не узкими ядерными специалистами, но достаточно грамотными людьми, чтобы почувствовать важность и смысл документов.

Конечно, информационная ценность документов была неравнозначной, но многие фрагменты разведанных утвердили И.В. Курчатова в правильности его планов. После знакомства с подробностями развития атомных проектов в ведущих державах, к Курчатову пришло полнейшее осознание тех задач, которые предстояло решать.

Трудности усугублялись тем, что невиданные по дерзости с позиций здравого смысла работы, разворачивались в воюющей стране, испытывающей нужду буквально во всём от гвоздей и электроэнергии до комплектующих деталей электронной аппаратуры и сахара.

Но с другой стороны, уверенность руководства страны в победе над фашистской Германией и достаточно предсказуемые дальнейшие отношения с союзниками делали владение атомным оружием просто жизненно необходимым.

Не могла страна, перенесшая столь страшную войну и столько потерявшая за это роковое время, оказаться неготовой к новым невиданным угрозам. А некоторые, по ту сторону океана, этого ждали.

Вспомните волокиту с открытием второго фронта. Союзники явно выжидали, чья сила всё-таки возьмёт. Это сейчас представляется всё на удивление сглаженным, а времена для нашей Родины действительно были критическими.

В первую очередь И.В. Курчатову и его сотрудникам было необходимо решить следующие первоочередные задачи:

- Геологическая разведка урановых руд и способов их обогащения;
- Производство в промышленных масштабах химически чистого графита;
- Разработку конструкторской документации на строительство уран-графитового ядерного реактора;
- Производство дейтерия (тяжёлой воды);
- Разработка эффективных способов разделения изотопов урана;
- Конструкторские и технологические разработки атомных бомб;

На перспективу ставились задачи поиска способов мирного использования энергии делящихся радиоактивных ядер. Для запуска реактора, предназначенного для производства плутония, требовалось 1000 тонн чистого графита и около 100 тонн металлического урана.

Таких производств, так же как и у американцев в начале их пути в стране не было, нужно было создавать сложнейшие производства в воюющей обескровленной, напрягающейся из последних сил стране.

Задача строительства реактора была поставлена перед учеником Курчатова молодым и талантливым физиком И.С. Панасюком, которому приходилось быть одновременно и физиком и химиком и строителем и администратором.

Сразу после организации «Лаборатории №2» были командированы в осаждённый Ленинград специалисты для поиска уцелевших деталей циклотрона. Был найден главный элемент устройства – 75 тонный электромагнит, который был тут же доставлен в Москву, где началось восстановление агрегатов.

Работы по реанимации циклотрона возглавил Л. Немёнов. Циклотрон заработал в сентябре 1944 г. Из образцов урана брат Курчатова Борис Васильевич сначала выделил нептуний, а затем и плутоний.

Возникли трудности с получением графита. Первая партия, выпущенная на электродном заводе, оказалась непригодной. В веществе содержалось много примесей, в частности бора и кадмия, которые были хорошими поглотителями нейтронов.

С таким графитом цепная реакция начаться не могла. Пришлось учёным переквалифицироваться в технологов и вместе с заводскими специалистами доводить технологию производства до приемлемого уровня. Только в начале 1945 г. удалось наладить производство графита требуемой чистоты.

Для организации геологической разведки урановых руд была создана специальная комиссия, в которую вошли В.И. Вернадский, А.П. Виноградова и В.Г. Хлопина. Геологическая разведка была развёрнута в Средней Азии и на Украине.

В 1944 г. по этому направлению работали 90 геологических партий, а в 1945 г. уже – 250 партий. Добыча урановой руды в общей сложности была увеличена по сравнению с довоенным периодом в 30 раз.

В послевоенный период урановая руда дополнительно закупалась в Польше и Восточной Германии. В конце 1946 г. на отечественных вновь созданных обогатительных комбинатах было получено достаточное для запуска ядерного реактора количество металлического урана.

6.2. Манхэттенский проект

Рассмотрим основные этапы проведения работ по созданию первых атомных бомб в США по материалам, опубликованным в открытой печати военным куратором Манхэттенского проекта, американским бригадным генералом Лесли Гровсом.

Это тот самый Гровс, который в 1942 г. был повышен до звания бригадного генерала и назначен руководителем американского атомного проекта. Именно этот легендарный для США генерал придумал проекту кодовое название Манхэттенский и выбирал места для строительства атомных объектов, а в последствии организовывал их слаженную работу и снабжение (рис. 6.10).

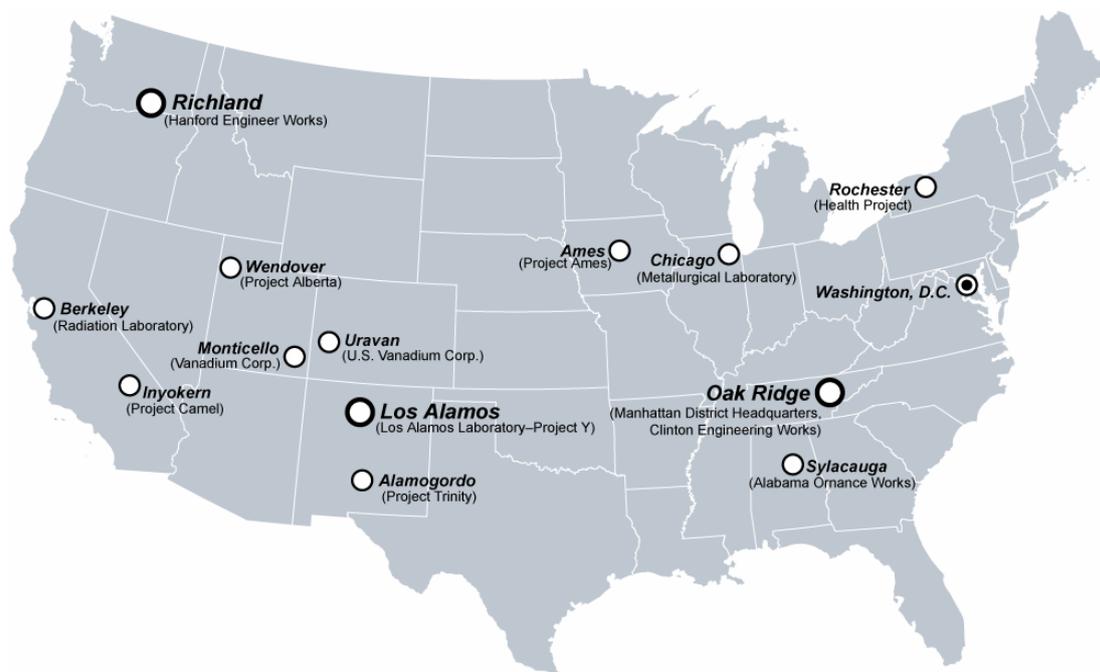


Рис. 6.10. Атомные объекты США



Рис. 6.11. Лесли Гровс

Генерал Гровс занимался подбором и расстановкой руководителей отдельных направлений проекта. В частности, настойчивость Гровса позволила привлечь для научного руководства всем проектом привлечь Роберта Оппенгеймера.

До того как заняться атомным проектом Гровс не занимался физикой, помимо административной деятельности в военном ведомстве США он был специалистом по строительству. Под его умелым руководством было построено здание Пентагона, чем он и обратил на себя внимание властей, как военных, так и гражданских.

Опыт возведения Пентагона показал, что Гровс прекрасный организатор, может ладить с людьми и, что самое главное способен решать поставленные задачи в короткие сроки с высокой эффективностью.

При своём назначении руководителем проекта Гровс настоял на присвоении ему звания бригадного генерала, заявив: «Мне часто приходилось наблюдать, что символы власти и ранги действуют на ученых сильнее, чем на военных».

Уже после успешного завершения проекта многие американские средства массовой информации обвиняли генерала в отсутствии человечности и лояльности к подчинёнными, что становилось причиной многочисленных конфликтов с учёной братией, которая, имея за плечами мировую известность, не всегда была склонна подчиняться военной дисциплине, установленной руководителем проекта.

После окончания войны Гровс как-то заявил журналистам, что ему удалось создать изумительную машину с помощью «величайшей коллекции битых горшков», имея в виду ученых-атомщиков, в числе которых было несколько лауреатов Нобелевской премии.

Как известно, 6 декабря 1941 г. правительство США приняло решение о выделении крупных ассигнований на разработку и изготовление атомного оружия. Все виды работ было поручено курировать военному ведомству, потому что работы, по известным причинам, предполагалось проводить в обстановке строжайшей секретности.

Только спустя 20 лет после завершения Манхэттенского проекта о нём начали просачиваться некоторые подробности. Советская разведка не в счёт, это особая тема, которая будет кратко затронута далее.

Наши современные журналисты довольно часто ставят в вину тогдашнему руководству СССР (Сталину, Берии, Курчатову) неоправданную, на их взгляд, жёсткость при организации работ по созданию атомного оружия.

С высот теперешней псевдо демократии, действительно, некоторые административные решения могут казаться излишне заорганизованными с таким лагерным привкусом. Однако и опыт проведения аналогичных работ в США тоже мало похож на виды Палестины в волшебном фонаре.

Лесли Гровс, в частности, не скрывает соей гордости по поводу возведения им небывалой стены секретности. По его мнению, одним из главных мотивов таких стараний, раздражавших учёных, была необходимость: «Сохранить в тайне от русских открытия и детали проектов и заводов».

Под началом генерала учёные работали в условиях тщательно дозированной информации. В пределах одной лаборатории для общения между отдельными группами сотрудников требовалось разрешение военной администрации.

Были и комические прецеденты. Некто Генри Д. Смит руководил одновременно двумя отделами. Так вот, формально, для общения с самим собой по научным и производственным вопросам он должен был получать специальное разрешение Гровса.

Естественно, что в пределах Манхэттенского проекта была развёрнута мощнейшая собственная служба безопасности, которой, помимо отслеживания режима вменялись в обязанности анкетирование, допросы, подслушивание, слежение за официальной и личной перепиской всего персонала, от посудомоек до ведущих специалистов.

На особо секретных объектах личная переписка и телефонные разговоры были вообще запрещены. Сам Гровс с целью сохранения режима секретности даже избегал письменных докладов начальству о состоянии работ. Предпочитал устные сообщения, как говорится с глазу на глаз.

Собственная контрразведка Гровса действовала в обход ФБР и госдепартамента США вплоть до начала в феврале 1945 г. Ялтинской конференции, когда о бомбе союзникам официально объявил президент.

В риторическом вопросе: «Бомбить или не бомбить?» для Гровса естественно, как истинного военного, сомнений не могло быть. Конечно, бомбить, учитывая всё затраченное на создание атомных бомб и возможность заявить о стратегическом приоритете над СССР, который к моменту окончания войны имел самую многочисленную, опытную и дееспособную армию мира.

А это пугало и заставляло настаивать на испытаниях бомб в реальных условиях современной войны. А тут ещё «битые горшки», многие из которых ввязались в Манхэттенский проект из-за боязни, что у Гитлера атомное оружие появится раньше и мир окажется беззащитным перед немецкой ядерной угрозой.

Когда выяснилось, что если даже у немцев бомба есть в стадии «вот, вот», то они не успеют ею воспользоваться, некоторые учёные категорически возражали против бомбардировок Хиросимы и Нагасаки.

Даже Альберт Эйнштейн по этому поводу, правда уже после того как, пропиа-рился: «Если бы я знал, что немцам не удастся создать атомную бомбу, я бы пальцем не пошевелинул».

После испытаний атомного заряда в Аламогордо многие её создатели открыто выступали против бомбардировок Японии. В Чикагском университете даже была создана специальная комиссия под председательством лауреата Нобелевской премии профессора Франка, в которую входил и Лео Сциллард.

Комиссия направила президенту Трумэну письмо от имени 67 ведущих учёных, участников проекта с обоснованием нецелесообразности атомной бомбардировки. В письме, в частности, обращалось внимание высшего руководства страны, на то, что сохранить монополию в производстве атомного оружия долгое время США сохранить не удастся. Два миллиарда, затраченных на Манхэттенский проект и обоснования военных перевесили в глазах президента доводы учёных.

Гровс по этому поводу говорил: «Наблюдая, как проект пожирает гигантские средства, правительство всё более склонялось к мысли о применении атомной бомбы. Трумэн не так уж много сделал, сказав «да», ибо в то время нужно было иметь больше мужества, чтобы сказать – нет».

Как водится, решение о бомбардировке Японии было упаковано в привлекательную для обывателя обёртку. Тут были заверения о крайней военной необходимости и о защите американских интересов на Дальнем Востоке. В своём оправдательном, по сути, обращении к нации Трумэн уверил всех, что атомные бомбардировки сохранят жизни многим тысячам американских солдат. Пипэл и на этот раз схавал.

А на самом деле Япония уже была повержена, на севере стояли советские войска, уже освободившие Сахалин и Курильские острова.

По большому счёту взрывы предназначались для устрашения СССР. Бабахнуть надо было исходя не из военных интересов, а из чисто политических, что собственно и определило выбор целей.

Нужны были города с большим населением, равнинная местность и значительная площадь. В начальном варианте Гровсом от имени проекта были предложены города Киото, Ниагата, Хиросима и Кокура.

Политики посчитали, что бомбардировка древней столицы Японии, Киото не совсем гуманно. Киото заменили Нагасаки. Когда цели были уточнены, то оказалось, что вблизи них находятся лагеря военнопленных, в числе которых в основном были американцы, но Гровс приказал не брать это во внимание. Лес рубят, щепки летят. Перед тем как первую бомбу отправить в последний путь на аэродроме набожные американцы устроили богослужение, благословив пилотов на «святое» дело, и подчеркнув тем самым, что Всевышний одобряет это действие.

При развёртывании Манхэттенского проекта основными задачами было получение в необходимых количествах для создания бомбы радиоактивных материалов, урана и плутония.

По оценкам учёных получение плутония в достаточных количествах можно было осуществлять в ядерном реакторе для запуска, которого требовалось 45 тонн металлического урана или двуокиси урана.

Первая промышленная установка была создана на базе Металлургической лаборатории Чикагского университета, руководимой Артуром Коптоном.

Гровс встретился с Комптоном, Ферми, Франком, Вигнером и Сциллардом 5 октября 1942 г. Следует напомнить, что именно Лео Сциллард уговорил Эйнштейна подписать письмо американскому президенту о необходимости развёртывания работ по урановому проекту.

Во время этой встречи учёные занимались ликбезом, они популярно разъясняли Гровсу предлагаемую технологию производства плутония и свойства, построенной на его основе бомбы.

Гровса, прежде всего, интересовали количества материалов, для того чтобы определить для себя и других военных масштабы предстоящих работ.

После этой встречи генерал сетовал, что обстановка для него была непривычной. Впервые в его биографии было необходимо планировать грандиозную по масштабам работу не на основании конкретных вводных, как это принято у военных всего мира, а на непроверенных гипотезах «дырявых горшков».

Особенно Гровса ставило в тупик то обстоятельство, что сами учёные вероятность правильности своих гипотез оценивали не более 30%. Когда речь зашла о плутонии, то оказалось что его может потребоваться от 40 до 400 кг. Это бесило Гровса, он не мог себе представить, как в таких условиях можно было осуществлять разумное планирование производств.

В своих мемуарах Гровс сравнивал себя с поваром, которому предлагалось обслуживать гостей количеством от 10 до 1000.

Вопросы возникали на каждом шагу. Одним из них была задача охлаждения реактора. Чем его охлаждать? Были варианты гелия, воздуха и воды. По началу учёные остановились на гелии, но потом оказалось, что этот теплоноситель неудобен по целому ряду причин, пришлось вернуться к идее использования воды.

Гровс после посещения лаборатории определил для себя, что плутониевая бомба более реальна, чем урановая, т.к. последний вариант был связан с разделением изотопов урана, технология, которой была ещё более туманна, чем получение плутония.



Рис. 6.12. Артур Комптон с Ричардом Доуном

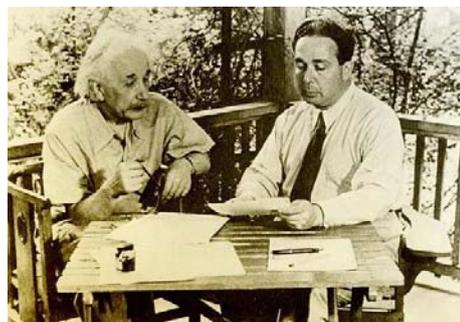


Рис. 6.13. А. Эйнштейн и Л. Сциллард

Получение плутония. Плутония в лабораторных условиях было получено микроскопическое количество. Даже в декабре 1943 г. Программа располагала всего двумя миллиграммами материала, в то время как с разделением изотопов урана была полная неясность.

Для выполнения огромного объёма конструкторских, проектных и технологических работ была привлечена фирма «Дюпон», инженерно-конструкторский состав которой отличался высоким уровнем профессионализма. Специалисты этой фирмы сделали себе имя на выполнении больших строительных заказов, кроме того, до развёртывания Манхэттенского проекта Гровсу доводилось работать с фирмой в рамках армейского строительства, что было не маловажно, с учётом предстоящих масштабов производства.

Не все участники проекта разделяли мнения Гровса о привлечении к работам крупных промышленных компаний. Учёным, особенно из числа выходцев из Европы, было свойственно переоценивать свои возможности в областях творчества, смежных с научной деятельностью.

Иные из них считали, что достаточно собрать вместе 10 – 100 талантливых инженеров, естественно под их, учёных, мудрым руководством и дело пойдёт. Дело в том, что никто из этих «головастиков» даже не представлял себе истинного масштаба предстоящих работ.

В последствии оказалось, что на подготовке плутониевого производства было задействовано более 45 000 специалистов. Даже такой промышленный гигант, как «Дюпон», несмотря на невиданные государственные субсидии, работал на пределе сил и возможностей.

Конечно, Гровсу было сложно с учёными, особенно с Чикагской командой, где собрались вместе исследователи самой высшей мировой пробы, которые в принципе, даже гипотетически не предполагали контроля над своей деятельностью.

При переговорах со специалистами фирмы «Дюпон» от имени правительства Гровс подчеркнул, что против ядерного оружия не существует никакой защиты, кроме страха перед возмездием, поэтому чтобы возмездие не наступило, работы должны вестись в режиме глубокой секретности, несмотря на участия в них большого количества персонала.

Работы по плутонию необходимо было начинать ещё вчера, несмотря на то, что до конца не ясны способы защиты от радиации связанных с этим производством людей. Кроме того, развёртывание производства необходимо начинать без традиционных предварительных лабораторных испытаний и опытной эксплуатации отдельных циклов.

Не исключалась так же возможность выхода из-под контроля цепной реакции, т.е. перехода процесса деления ядер урана в режим взрыва, т.к. конструкция реактора была, мягко говоря, не отработанной в этом отношении.

К моменту начала промышленного строительства были решены только принципиальные теоретические вопросы. Специалисты фирмы «Дюпон» после трёхдневного общения с Гровсом и учёными из Чикаго резюмировали своё мнение: «Полной уверенности в осуществимости процесса не может быть по следующим причинам:

- Самоподдерживающаяся ядерная реакция не осуществлена на практике;
- Ничего определённого о тепловом равновесии такой реакции не известно;
- Ни одна из рассмотренных к тому времени конструкций ядерного реактора не выглядит осуществимой;
- Возможность извлечения плутония из высокорadioактивного вещества также не является доказанной;

- Даже при самых благоприятных предположениях о каждой стадии процесса производительность завода в 1943 г. будет составлять несколько граммов плутония, а в 1944 г. – немногим больше. Если предположить, что действующий завод удастся построить в срок, производство плутония достигнет запланированной величины не ранее 1945 г. Однако эта величина может оказаться и недостижимой;
- Практическая полезность цикла, разработанного в Чикагской лаборатории, не может быть определена без сравнения его с урановым циклом, над которым работают лаборатории Колумбийского университета в Беркли, поэтому необходимо провести исследования и сравнить эти методы».

Несмотря на шесть убийственных доводов специалистов, совет директоров фирмы принял решение об участии фирмы «Дюпон» в Манхэттенском проекте.

А тем временем в 25 км от Чикаго в Аргоннском лесу началось строительство подсобных помещений и вспомогательных лабораторий ядерного реактора. Вследствие недостатка квалифицированной рабочей силы, работы шли медленно, поэтому по предложению Комптона было решено построить малый экспериментальный реактор под трибунами университетского стадиона в Чикаго, для отработки технологии и проверки самой идеи.

Решение об использовании стадиона было во многом авантюрным. Только по недоумию можно было располагать экспериментальный ядерный реактор в центре многомиллионного города, под трибунами действующего стадиона. Учёные, будучи по жизни большими оптимистами, убедили военное и гражданское руководство, что реактор не опаснее кастрюли кипящего супа, выключил газ, – кипение прекратилось.

Однако повезло и 2 декабря 1942 г. Реактор был запущен в безаварийном режиме. В инстанции пошла знаменитая шифровка: «Итальянский мореплаватель высадился в Новом Свете. Туземцы настроены дружелюбно».

Это означало, что у Ферми всё получилось, и реактор заработал. Была осуществлена впервые в мире управляемая цепная реакция, однако это совсем не означало, что возможно промышленное получение плутония в количествах, достаточных для конечной цели – атомной бомбы.

Передовое достижение Ферми, вместе с тем, не гарантировало, что атомная бомба взорвётся вообще. В реакторе нейтроны замедлялись графитом, затем легко захватывались ядрами радиоактивного вещества.

По естественным причинам разместить в бомбе замедлитель не представлялось возможным, т.е. образующиеся при первых же актах деления нейтроны будут быстрыми и могут пролетать ядра активного вещества, не задерживаясь, а это исключало возможность взрывообразного протекания процесса.

Комптон и его учёная компания, однако, настаивали на том, что вероятность взрыва плутониевой бомбы составляет около 90%. Им поверили и прибавили прыти в строительстве плутониевых объектов. Учёные уверяли, что если правительство их поддержит, то бомбу можно сделать уже в 1944 г., а в начале 1945 г. можно будет изготавливать по одной бомбе в месяц.



Рис. 6.14. Энрико Ферми в Чикаго

Этим пророчествам не суждено было сбыться в полной мере. На лабораторном столе и в рабочих тетрадях учёных всё казалось простым и достижимым, на практике же, на инженерном и строительном уровне возникали трудности, на преодоление которых требовалось время и силы, не говоря уже о средствах.

Учитывая состояние и темпы строительства, и несмотря на нежелательность расширения круга осведомлённых лиц, к проекту привлекли ещё два промышленных гиганта, фирмы «Дженерал электрик» и «Вестингауз».

Лос-Аламос. До определённого уровня развития Манхэттенского проекта проектированию самой бомбы уделялось мало внимания, потому что отсутствовала уверенность в возможности получения в больших количествах U^{235} и Pu^{239} .

Реальную конструкцию бомбы, из тех, кому её предстояло строить, ещё не представляли. По протекции Комптона научным руководителем разработок был назначен Роберт Оппенгеймер, профессорствовавший до этого в Калифорнийском университете в Беркли.

Оппенгеймер начал традиционно. Он собрал вокруг себя небольшой коллектив теоретиков и поставил задачу. При первом же предварительном рассмотрении оказалось, что о конструкции бомбы учёным известно не на много больше, чем американским домохозяйкам.

Оптимистичное представление о возможности создания бомбы 20 учёными в течение трёх месяцев улетучилось при первых же вопросах инженерно-технического персонала и военных. Стало очевидным, что работы по конструированию бомбы надо было начинать, не дожидаясь накопления требуемого количества взрывчатого радиоактивного вещества.

Понимал это Роберт Оппенгеймер и Артур Комптон. Оппенгеймер, как известно в те времена не был лауреатом Нобелевской премии, что делало его в глазах именитых коллег менее авторитетным, поэтому избрание его кандидатуры на должность научного руководителя прошло не без колебаний, как со стороны учёных, так и со стороны военных.

Но, тем не менее, назначение состоялось, и Оппенгеймер приступил к организации лаборатории. Возникла проблема её размещения. Дело в том, что очень уж специфичные свойства разрабатываемого изделия, предъявляли и специфические требования к месту его расположения.

Место разработки, с одной стороны должно было быть не густонаселённым, но иметь возможность быстрого развёртывания коммуникаций, с другой стороны это должна быть местность с мягким климатом, позволяющим вести круглогодичное строительство и проведение многих работ под открытым небом и иметь большие запасы воды. Ко всему прочему, там было необходимо обеспечить проживание большого количества сотрудников в изолированном от внешнего мира режиме.

Остановились на окрестностях городка Альбукере, который с трёх сторон был окружён скалами, что упрощало обеспечение режима изоляции. Однако в районе функционировало несколько сотен фермерских хозяйств, имеющих землю в собственности. Население требовалось переселять, а это дело совсем не простое, затратное и не быстрое.

Следующим возможным районом был городок Лос-Аламос (штат Нью-Мехико). Этот район был всем хорош, кроме дефицита пресной воды. К району можно было добраться только по нескольким горным дорогам, которые можно было надёжно контролировать незначительными силами военной полиции. Район был настолько диким, что там даже закрылась единственная школа.

Невозможно было найти учителей, которые бы согласились работать в такой глуши. Именно школа стала первым строением, в котором начались все работы.

Работы по конструированию бомбы получили шифр «Проект Y». Основу проекта составили учёные, работавшие в Беркли под руководством Оппенгеймера.

При вербовке в проект учёных из университетских центров встала ещё и чисто финансовая проблема. В университете преподавательская

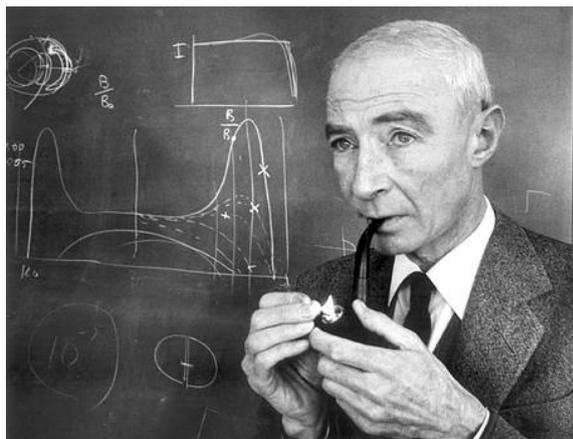


Рис. 6.15. Оппенгеймер в Лос-Аламосе

братия работала в течение 9 месяцев за хорошую зарплату в достаточно комфортабельных условиях, а в Лос-Аламосе условия были мало отличными от спартанских, плюс полная изоляция и зарплата не на много выше, чем в университетах.

Возможности существенно увеличить жалование учёным не было, потому что бомбу мастерили не только люди науки, но и многочисленные инженеры техники и обслуживающий персонал. Зарплата даже самых маститых учёных не должна была отличаться от прочих в разы, это бы внесло социальную напряжённость, которая на объектах такого типа не допустима.

В частности, Оппенгеймер, возглавивший проект, некоторое время получал меньшую, чем в университете зарплату. Гровс лично был вынужден вмешаться и в исключительном порядке увеличить Оппенгеймеру зарплату до университетского уровня.

Первоначально предполагалось что штат лаборатории будет составлять всего 100 человек, обслуживаемая малочисленным коллективом инженеров, техников и рабочих. По мере развёртывания работ, выяснилось, что эти цифры возрастут многократно. Первые сотрудники «Проекта Y» оказались в достаточно жёстких бытовых условиях, что для американцев, особенно учёных, было совершенно не привычно. Сотрудники были размещены на фермах вблизи Лос-Аламоса. Жильё было не благоустроено, а дороги не асфальтированы, система общественного питания не отлажена, продукты выдавали, о ужас, сухим пайком, телефонная связь в привычном режиме отсутствовала.

Строительство объектов в Лос-Аламосе осложнялось нехваткой квалифицированных строителей и не до конца выясненных особенностей конструкции атомного оружия. Одним из основных нерешённых теоретических вопросов, был вопрос о времени протекания неуправляемой цепной ядерной реакции.

Не было уверенности в том, что начавшийся процесс деления ядер разнесёт в клочья всю массу взрывчатого вещества и реакция затухнет в начальной стадии.

Наиболее простым просматривался, так называемый ствольный метод, когда одна подкритическая масса делящегося материала (рис. 6.16) направлялась как снаряд навстречу дру-

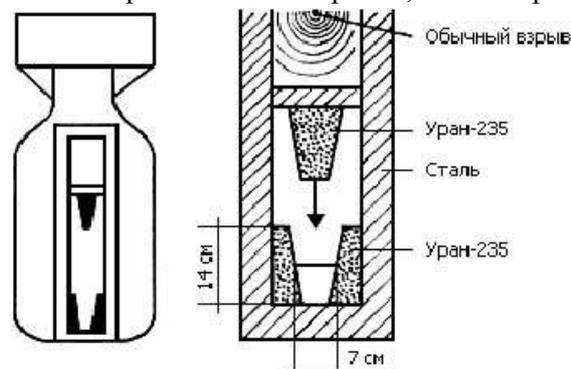


Рис. 6.16. Один из вариантов атомной бомбы ствольного типа

гой подкритической массы, игравшей роль мишени, образовавшаяся при этом масса была уже сверхкритической, теоретически следовало, что должен был последовать взрыв.

Эта схема была положена в основу конструкции «Малыш», которую по готовности метнули на Хиросиму.

Вторая рассматриваемая учёными, была имплозионная (взрывная) схема. Внутри корпуса бомбы организовывался сходящийся взрыв, объёмно сжимавший делящее вещество.

На рис. 6.17. красными прямоугольниками показана система зарядов обычного взрывчатого вещества, которые создают сферическую ударную волну всесторонне

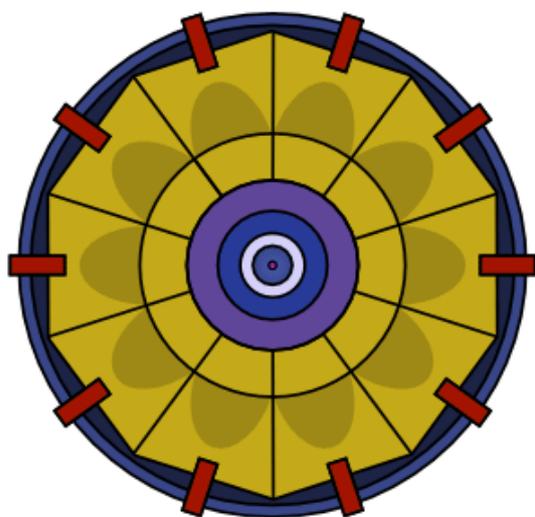


Рис. 6.17. Бомба имплозионного типа

сжимающую шаровой слой активного вещества (синий цвет) вокруг другой части вещества.

В результате уплотнения атомной взрывчатки должна была образовываться сверхкритическая масса радиоактивного вещества. Такая схема была реализована в проекте «Толстяк», который успешно опустился на «Нагасаки».

При лабораторных исследованиях оказалось, что простая ствольная схема не приемлема для плутониевого заряда, потому что была велика вероятность начала реакции в исходном состоянии надкритических масс.

В начале работы над бомбой было много принципиально неясного, будет ли это урановая бомба или плутониевая, а может заряд будет комбинированным. Именно в этом направлении шли основные работы. В конце концов работы стали вестись по двум направлениям, в производство пошли изделия Mk-I «Little Boy» и Mk-III «Fat Man».

В начале работы над бомбой было



Рис. 6.18. «Gadget» на башне

Если с изделием Mk-1, использующим в качестве взрывчатого вещества уран было более или менее всё понятно, а вот с плутониевым зарядом не всё было понятно. В этой связи было разработано специальное устройство «Gadget», которое должно было имитировать направленный взрыв с помощью обычной тротиловой взрывчатки массой около 100 тонн (рис. 6.18).

Взрыв провели 7 мая 1945 г. Среди взрывчатки кроме регистрирующей аппаратуры были размещены контейнеры с продуктами деления, полученными в реакто-

рах, что позволило установить примерную картину распределения радиоактивных остатков после взрыва и откалибровать датчики регистрации ударной волны. До этого такого количества взрывчатого вещества одновременно ещё никто не взрывал.

В июне месяце плутониевое взрывное устройство было собрано (рис. 6.19) и доставлено к месту испытания, к 30 метровой стальной башне, которую расположили на открытой местности. На расстоянии 9 км были оборудованы подземные наблюдательные пункты, а в 16 км от башни располагался основной командный пункт, а в 30 км – базовый лагерь.

Взрыв был намечен на 16 июля, это должно было произойти в 4 часа утра, но ввиду сильного дождя и ветра время взрыва пришлось перенести. Руководители работ Оппенгеймер и Гровс приняли, после консультаций с метеорологами, решение произвести взрыв в 5 ч. 30 мин. За 45 с. до взрыва была включена автоматика и весь самый сложный механизм прототипа бомбы начал работать в автономном режиме, без участия операторов, правда на главном рубильнике дежурил сотрудник, готовый по команде остановить испытание.

Взрыв состоялся. Физик Ганс Бете так описал свои впечатления: «Это походило на гигантскую вспышку магнезии, которая, как казалось, длилась целую минуту, но в действительности заняла одну или две секунды. Белый шар рос и через несколько секунд стал заволакиваться поднятой взрывом с земли пылью. Он поднимался, оставляя позади себя чёрный след из частиц пыли».

В первые секунды после взрыва все, включая Оппенгеймера, были подавлены величиной высвободившейся энергии. Придя в себя Оппенгеймер процитировал древний индийский эпос: «Я становлюсь смертью, потрясателем миров».

Энрико Ферми, не докладывая руководителям, решил самостоятельно оценить силу взрыва. Он насыпал мелко нарезанные бумажки на горизонтально расположенную ладонь, которую выставил из укрытия во время прохождения взрывной волны. Бумажки сдуло. Измерив дальность их горизонтального полёта от вычислил их примерную начальную скорость, а затем оценил мощность взрыва.

Оценки Ферми совпали с данными, полученными после обработки телеметрии. После взрыва Ферми испытал нервное потрясение до такой степени, что не мог самостоятельно вести машину.

Все прогнозы по мощности взрыва не оправдались, причём в большую сторону. Роберт Оппенгеймер в результате собст-

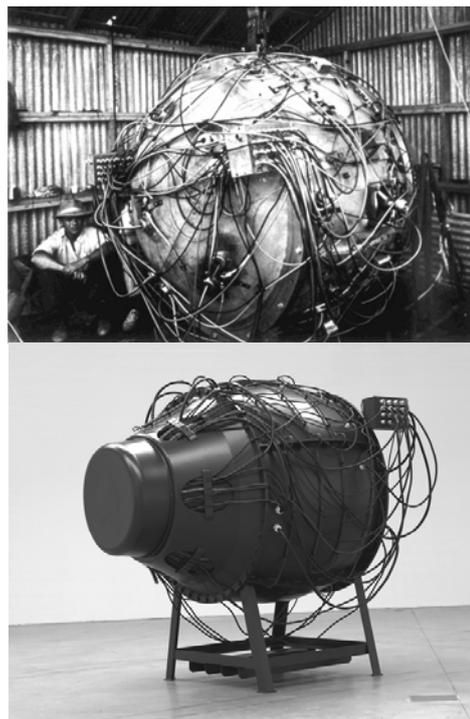


Рис. 6.19. Плутониевый контейнер



Рис. 6.20. После взрыва. Оппенгеймер и Гровс у остатков башни

венных вычислений получил цифру 300 тонн в переводе на тротильный эквивалент. Военные в официальном сообщении для прессы дали информацию о взрыве склада обычных боеприпасов.

Кратер взрыва имел диаметр около 80 м и всего двухметровую глубину, потому что взрыв произошёл на 30 м. высоте. В радиусе 250 м. вся площадь была покрыта зеленоватым стеклом, образовавшимся из расплавленного песка SiO_2 .

Как показали измерения, радиоактивное облако взрыва поднялось на высоту примерно в 11 км и было унесено ветром на расстояние до 160 км, в ширину зона заражения составляла около 50 км. Максимальная величина радиоактивности была зафиксирована на расстоянии 40 км от эпицентра и составляла 50 рентген.

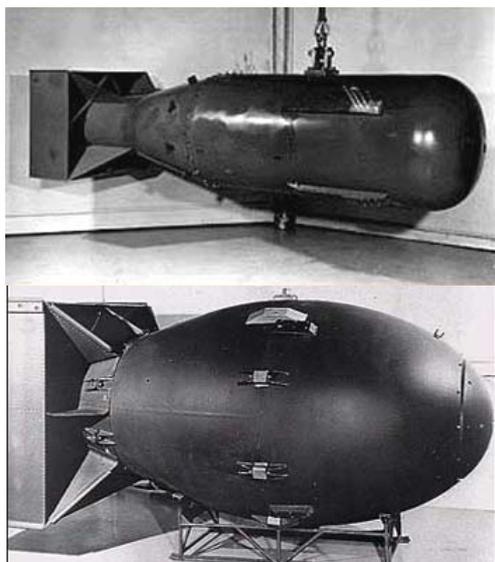


Рис. 6.21. Изделия Mk-I «Little Boy» и Mk-III "Fat Man"

Первые атомные бомбы. После успешных испытаний экспериментального плутониевого заряда началась подготовка бомб для «настоящей работы» (рис. 6.21), бомба «Малыш» имела диаметр 0,7 м, длину – 3 м, массу – 4 т. и урановый заряд массой 16 кг. Бомба «Толстяк» имела диаметр – 1,5 м, длину – 3,2 м, массу – 4,63 т, массу плутония – 21 кг.

6 августа 1945 г. с борта бомбардировщика ВВС США В-29 была сброшена первая атомная бомба на японский город Хиросима. Сразу после успешного проведения операции утрашения президент Соединённых Штатов Америки Гарри Трумен выступил с заявлением: «Шестнадцать часов назад американский самолет сбросил единственную бомбу на Хиросиму, важную базу японской армии. Эта бомба

обладала большей мощностью, чем 20 000 тонн тротила. Ее заряд более чем в две тысячи раз превосходит заряд британского Grand Slam'a, самой большой бомбы из использовавшихся в истории войн».

Врыв первой атомной бомбы в течение микросекунд смёл с лица земли 10,25 км² города Хиросима, при этом сразу **в атомном смерче погибло 66 тыс. человек, пострадало – 135 тыс. человек.**

Вторая бомба, сброшенная 9 августа 1945 г. на Нагасаки сразу **унесла жизни 39 тыс. человек, пострадало от взрыва – 64 тыс. человек.** Обе бомбы были сброшены с борта стратегических бомбардировщиков В-29.

Как установили эксперты – учёные после бомбардировок, взрывы атомных бомб отличаются от аналогичных процессов при традиционных химических взрывах. Обычный взрыв, это преобразование одного вида внутренней энергии вещества в другой с сохранением начальной массы реагирующего вещества. При атомном взрыве наблюдается преобразование массы активного вещества в энергию взрывной волны и излучения. При оценке энергетической эффективности атомного взрыва следует иметь в виду, что скорость света составляет $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с, которую при подсчёте энергии следует возводить в квадрат, т.е. $c^2 \approx 9 \cdot 10^{16}$ м²/с², отсюда и колоссальный энергетический выход, не сравнимый по порядку величин с обычной взрывчаткой.

6.3. Создание атомного оружия в СССР

О возможности использования энергии деления ядер радиоактивных веществ в СССР учёные заговорили в 1939 г., когда состоялось IV Всесоюзное совещание по атомному ядру в г. Харькове. В 1940г. В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин в своём письме А.Н. Булганину, заместителю председателя Совета Народных Комиссаров писали: «Открытие в 1939 году явления деления ядра атома урана под действием нейтронов, сопровождающегося выделением огромных количеств энергии, и особенно тот факт, что процесс этот порождает возникновение новых нейтронов в количестве, превосходящем то, которое необходимо для того, чтобы его вызвать, впервые вплотную поставили вопрос о возможности использования внутриатомной энергии для нужд человечества.

Нетрудно видеть, что если вопрос о техническом использовании внутриатомной энергии будет решён в положительном смысле, то это должно в корне изменить всю прикладную энергетику.

Важность этого вопроса вполне сознаётся за границей, и по поступающим оттуда сведениям в Соединённых Штатах Америки и Германии лихорадочно ведутся работы, стремящиеся разрешить этот вопрос, и на эти работы ассигнуются большие средства.

Мы полагаем, что уже сейчас назрело время, чтобы правительство, учитывая важность решения вопроса о техническом использовании внутриатомной энергии, приняло ряд мер, которые обеспечили бы Советскому Союзу возможность не отстать в разрешении этого вопроса от зарубежных стран».

В 1940 г. отечественные учёные Я.Б. Зельдович и Ю.Б. Харитон опубликовали в открытой печати свою работу «Кинетика цепного распада урана», где впервые показали возможность осуществления цепной реакции деления ядер урана.

В частности в статье говорилось: «При столь бурном развитии цепного распада мы не вправе более отвлекаться от рассмотрения создания самих сверхкритических условий, при которых цепной распад только и возможен. Время проведения процессов, осуществляющих переход критических условий, например время сближения двух урановых масс, каждая из которых в отдельности находится в докритической в отношении цепного распада области, вряд ли удастся сделать хотя бы сравнимым со временем разгона реакции».

В октябре 1940 г. сотрудники Харьковского ядерного центра В.А. Маслов и В.С. Шпинель подали в Бюро изобретений Народного комиссариата обороны СССР секретную заявку на изобретение «**Об использовании урана в качестве взрывчатого и отравляющего вещества**».

Суть изобретения формулировалась авторами следующей фразой: «Проблема создания взрыва в уране сводится к созданию за короткий промежуток времени массы урана в количестве, значительно большем критического. Осуществить это, мы предлагаем путём заполнения ураном сосуда, разделённого непроницаемыми для нейтронов перегородками таким образом, что в каждом отдельном изолированном объёме – секции – сможет поместиться количество урана меньше критического. После заполнения такого сосуда стенки при помощи взрыва удаляются, и вследствие этого в наличии оказывается масса урана значительно больше критической. Это приведёт к мгновенному возникновению уранового взрыва».

По сути это был проект атомной бомбы. Несмотря на не очень лестные отзывы коллег, отдел изобретательства хоть и с большой задержкой выдал авторское свидетельство. А отзывы по заявке были убийственными.

Так, например, академик Хлопин в своей рецензии написал: «Положение с проблемой урана в настоящее время таково, что практическое использование внутриатомной энергии, которая выделяется при процессе деления его атомов под действием нейтронов, является более или менее отдалённой целью, к которой мы должны стремиться, а не вопросом сегодняшнего дня. Следует относительно заявки сказать, что она в настоящее время не имеет под собой реального основания». Далее академик рекомендует авторам отвлечься от атомного взрыва, а попытаться придумать способы использования ядерной энергии в двигателях, например – авиационных.

А между тем, вопросы организации цепной реакции деления радиоактивных веществ исследовались в стране достаточно интенсивно, чему свидетельствует открытие Г.Н. Флёрвым и К.А. Петржаком спонтанного деления урана, сопровождающимся генерированием новых нейтронов.

Начавшаяся 22 июня 1941 г. война с Германией по объективным причинам приостановила ядерные исследования в СССР, в то время как в Германии, США и Великобритании такие работы только наращивали темпы.

Вместе с тем высшее руководство страны, несмотря на уверения официальных академиков о невозможности создания атомного оружия (Лев Давидович Ландау теоретически «доказал» невозможность атомного взрыва) осознавало важность работ по урану для обороноспособности.

Уже 6 июля 1941 г. было принято постановление №34 сс о назначении уполномоченного ГКО по вопросам координации и усиления научной работы в области физической химии для нужд обороны. Была организована комиссия в составе П.Л. Капицы, С.С. Намёткина, О.Ю. Шмидта в задачи которой ставилось организация оборонных работ по физике.

Капица П.Л. был одним из первых в нашей стране, кто посчитал нужным публично предупредить руководство об опасности, связанной с возможностью создания атомной бомбы за рубежом: «Одним из важных средств современной войны являются взрывчатые вещества. Наука указывает принципиальные возможности увеличить их взрывную силу в полтора-два раза.

Но последнее время даёт нам ещё новые возможности использования внутриатомной энергии, об использовании которой писалось раньше только в фантастических романах.

Теоретические подсчёты показывают, что если современная мощная бомба может, например, уничтожить целый квартал, то атомная бомба даже небольшого размера, если она осуществима, с лёгкостью могла бы уничтожить крупный столичный город с несколькими миллионами населения.

Моё личное мнение, что технические трудности, стоящие на пути использования внутриатомной энергии, ещё очень велики. Пока это дело ещё сомнительное, но очень вероятно, что здесь имеются большие возможности.

Мы ставим вопрос об использовании атомных бомб, которые обладают огромной разрушительной силой. Сказанного, мне кажется, достаточно, чтобы видеть, что работа учёных может быть использована в целях оказания возможно более эффективной помощи в деле обороны нашей страны. Будущая война станет ещё более нетерпимой. Поэтому учёные должны сейчас предупредить людей об этой опасности, чтобы все общественные деятели мира напрягли все свои силы, чтобы уничтожить возможность дальнейшей войны, войны будущего»

В ноябре 1941 г. будучи в командировке в Казани, куда эвакуировался Ленинградский физико-технический институт, выступил на семинаре с предложением начать работы по атомной бомбе. В это же время Флёров написал И.В. Курчатову письмо в котором набросал схему атомной бомбы (рис. 6. 22). Бомба по схеме Флёрова состояла из стального полого цилиндра, в который с высокой скоростью 50 – 3000 м/с вдвигалась урановая сборка, находящаяся в подкритическом состоянии. По мнению автора во время нахождения в стальном стволе, отражающиеся от стенок нейтроны должны были инициировать цепную реакцию.

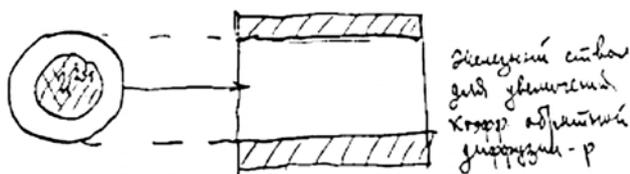


Рис. 6. 22. Первая схема бомбы Г.Н. Флёрова

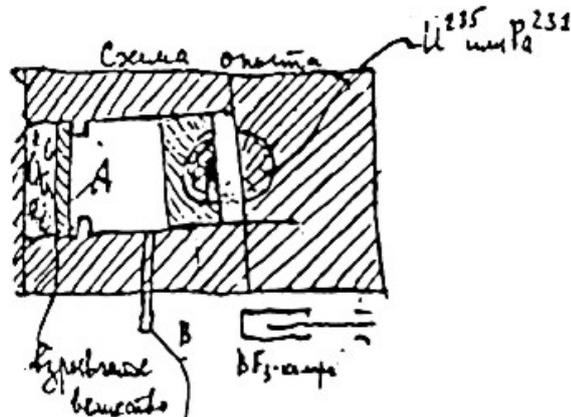


Рис. 6.23. Вторая схема бомбы Г.Н. Флёрова

В июне 1942 г. Флёров с фронта прислал Курчатову второй вариант конструкции атомной бомбы (рис. 6.23), в которой предполагалось реализовать идею «пушечного сближения» двух надкритических масс. Вторая конструкция Флёрова совпадала во многом с секретной заявкой В.А. Маслова и В.С. Шпинеля, поданной ещё в 1940 г.

В конце сентября 1942 г. после обращения в правительство Г.Н. Флёрова и И.В. Курчатова и других заинтересованных учёных И.В. Сталиным было подписано распоряжение Государственного комитета обороны № 2352 сс «Об организации работ по урану» (рис. 6.24).

Напомним, что это распоряжение было принято всего лишь месяц спустя после официального старта Манхэттенского проекта. В рас-

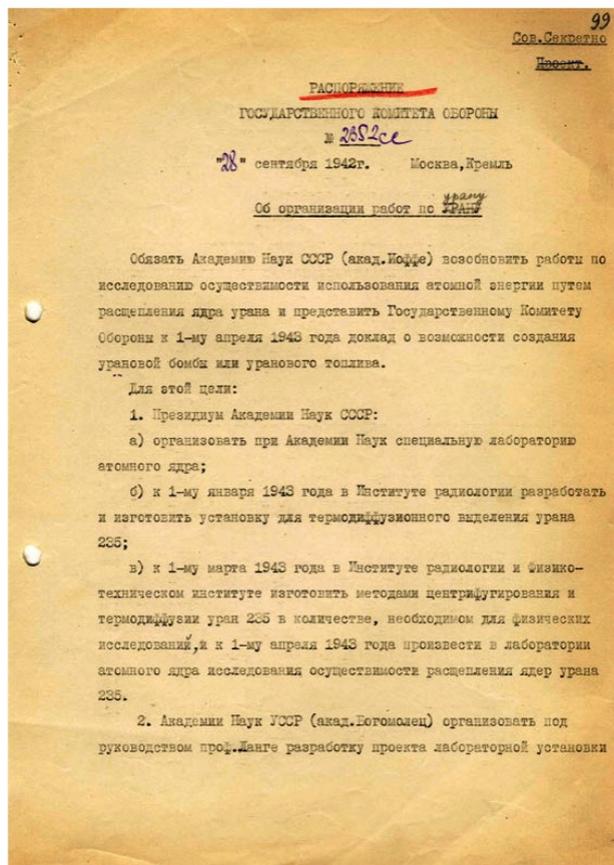


Рис. 6.24. Титульный лист «распоряжения»

поряжении, в частности, говорилось: «Обязать Академию наук СССР (акад. Иоффе) возобновить работы по исследованию осуществимости использования атомной энергии путём расщепления ядра урана и представить Государственному комитету обороны к 1 апреля 1943 года доклад о возможности создания урановой бомбы или уранового топлива».

В своём втором письме Г.Н. Флёрв писал: «Ну, и основное это то, что во всех иностранных журналах полное отсутствие каких-либо работ по этому вопросу. Это молчание не есть результат отсутствия работы, не печатаются даже статьи, которые являются логическим развитием ранее напечатанных, нет обещанных статей, словом, на этот вопрос наложена печать молчания, и это-то является наилучшим показателем того, какая кипучая работа идёт сейчас за границей».

Нам в Советском Союзе работу нужно возобновить, пусть вероятность решения задачи в ближайшее время крайне мала, но ничегонеделание наверняка не может привести к успеху, в то время как в процессе самой работы выясняется ряд новых дополнительных данных, могущих приблизить нас к решению вопроса».

На принятие решения о возобновлении работ по урану повлияли и внешние обстоятельства. Дело в том, что уже с сентября 1941 г. через разведывательные каналы в страну начали поступать сведения о проведении США совместно с Великобританией на секретной основе научно-исследовательских работ по перспективным использованиям атомной энергии в военных целях. Особый интерес представляла копия отчёта английского «Комитета MAUD», из которой следовало, что создание атомного оружия не представляется отдалённым, а уже совсем скоро может повлиять на ход войны.



Рис. 6. 25. А.Ф. Иоффе, А.И. Алиханов, И.В. Курчатов

Несмотря на то, что в распоряжении ответственным за возобновление и организацию работ был определён академик Абрам Фёдорович Иоффе, он последовательно во всех инстанциях продвигал на этот ответственный пост И.В. Курчатова, популяризируя его как сложившегося в ядерных вопросах учёного и весьма умелого организатора, о чём свидетельствовала его работа по проектированию и созданию первого отечественного синхрофазотрона в Ленинграде.

Когда с разведывательными данными ознакомили Курчатова в октябре – ноябре 1942 г., после его отъезда с фронта, он обратился с письмом на имя В.М. Молотова, в котором, в частности говорилось: «В исследованиях проблемы урана советская наука значительно отстала от науки Англии и Америки и располагает в данное время несравненно меньшей материальной базой для производства экспериментальных работ. В СССР проблема урана разрабатывается менее интенсивно, а в Англии и в Америке – более интенсивно, чем в довоенное время».

Масштаб проведённых Англией и Америкой в 1941 году работ больше намеченного постановлением ГКО Союза ССР на 1943 год. Имеющиеся в распоряжении материалы недостаточны, для того чтобы можно было считать практически осуществимой или неосуществимой задачу производства урановых бомб, хотя

почти и не остаётся сомнений, что совершенно определённый вывод в этом направлении сделан за рубежом.

Ввиду того, однако, что получение определённых сведений об этом выводе связано с громадными, а, может быть, и непреодолимыми затруднениями, и ввиду того, что возможность введения в войну такого страшного оружия, как урановая бомба, не исключена, представляется необходимым широко развернуть в СССР работы по проблеме урана и привлечь к её решению наиболее квалифицированные научные и научно-технические силы Советского Союза. Помимо тех учёных, которые сейчас уже занимаются ураном, представлялось бы желательным участие в работе: проф. Алиханова А.И. и его группы, проф. Харитона Ю.Б. и Зельдовича, проф. Кикоина И.К., проф. Александрова А.П. и его группы, проф. Шальникова А.И. Для руководства этой сложной и громадной трудностью задачей представляется необходимым учредить при ГКО Союза ССР под Вашим председательством специальный комитет, представителями науки в котором могли бы быть акад. Иоффе А.Ф., акад. Капица П.Л. и акад. Семёнов Н.Н.»

Докладная записка Курчатова легла на стол И.В. Сталину с резолюцией В.М. Молотова: «Прошу ознакомиться с запиской Курчатова». Результатом знакомства с запиской стало распоряжение об организации «Лаборатории №2», которой поручалось начать работы конкретно по атомной бомбе.

До недавнего времени история создания атомной бомбы в СССР оставалась темой закрытой для публикаций и анализа. Только в последние годы некоторые материалы, касающиеся всего проекта в целом, были частично обнародованы.

Такие предосторожности были вызваны тем обстоятельством, что в проекте создания отечественной бомбы участвовали не только учёные и политические деятели страны, но и разведчики.

В период разработок атомного оружия разведкой проводилась широкомасштабная операция «Энормоз» целью которой было обеспечение руководства страной и учёных информацией о состоянии дел по атомной проблеме за рубежом, прежде всего в США, Германии, Великобритании и Франции.

Так же как и учёные, разведчики обратили внимание на прекращение публикаций на атомные и смежные темы в открытой печати. Стало известно, что инициатором введения режима секретности стал венгерский учёный Лео Сцилард, переселившийся из Европы в Америку.

На эту уникальную ситуацию, когда учёный ставил вопрос о закрытии работ, обратил внимание начальник научно-технической разведки Леонид Квасников и нью-йоркский резидент Гайк Овакимян.

Квасников с подачи Овакимяна инициировал посылку резидентурам в США, Англии, Германии и Франции директив о начале поиска информации по исследовательским центрам, где могут вестись работы по атомной тематике.

Первыми откликнулись разведчики из Германии, которые сообщили, что вблизи г. Пенемюнде действует научный центр по разработке дистанционно управляемых ракет ФАУ-1 и ФАУ-2.

Потом последовала информация из Лондона о существовании секретного доклада Уинстону Черчиллю недавно созданного в Англии «Уранового комитета» о перспективах создания атомного оружия. Изучив информацию, Квасников доложил её краткое содержание Лаврентию Павловичу Берия, который, как обычно, отнёсся к сообщениям подозрительно, посчитав их сфабрированными иностранной разведкой для отвлечения материальных и людских ресурсов от нужд многочисленных фронтов. Примерно в это же время И.В. Сталин получил через личного секретаря Александра Николаевича Поскребышева сразу два письма с фронта Г.Н.

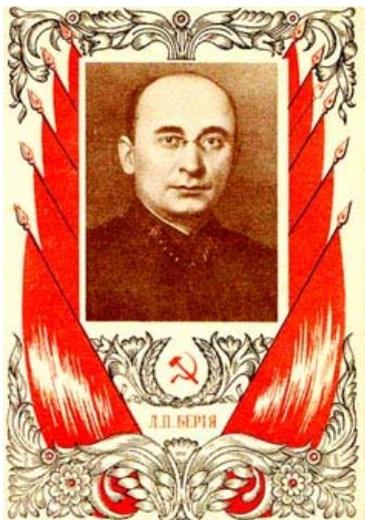


Рис. 6.26. Л.П. Берия



Рис. 6.27. И.В. Сталин

Флёрова в первом письме, в частности говорилось: «Одной ядерной бомбы достаточно для полного уничтожения Москвы или Берлина, в зависимости от того, в чьих руках бомба будет находиться. Государство, первым осуществившее ядерную бомбу, сможет диктовать миру свои условия».

Во втором письме учёный был более конкретен: «Это мое письмо последнее, после которого я, как ученый, складываю оружие, и буду ждать, когда удастся решить атомную задачу в Германии, Англии или США. Результаты будут настолько огромны и ошеломительные, что будет не до того, кто виноват в том, что у нас в Союзе забросили подобные работы».

Как известно, информация разведки и учёных сделало своё дело, и работы по урановой проблеме получили начальный импульс.

Разведке СССР стало так же известно, что президент США Рузвельт и премьер Англии У. Черчилль ведут переговоры о совместных работах по атомному оружию, что в США развёрнут Манхэттенский проект, а в Англии аналогичные работы проводились под шифром «Тьюб Эллойз».

Секретность была чрезвычайной, и только советской разведке удалось проникнуть в некоторые секреты разработок. В общей сложности, за время проведения операции «Энормоз» только из Америки удалось переправить в СССР 12 тыс. листов технической и научной секретной документации.

Об истинных источниках информации знал только И.В. Курчатов, остальные участники советского атомного проекта думали, что данные поступают из

советских центров, работающих над проблемой параллельно.

О первом атомном взрыве «Gadget» официальным лицам, воюющих против германии стран, стало известно 16 июля 1945 г. во время конференции глав правительств трёх держав в Потсдаме.

Получив шифровку «Роды прошли удачно», Трумэн, почувствовав себя в немислимом авторитете, решил преподнести эту новость Сталину. Распирало, знаете, ли. Предстояли не совсем удобные для США переговоры о будущем Европы, и вести их хотелось с позиции силы, как обычно.

К удивлению Трумэна, глава главной воюющей с немцами страны, не проявил к сообщению никакого интереса. Трумэн в этот же день сетовал Черчиллю на то, что похоже «усатый» его даже не понял.

Трумэн даже представить себе не мог, что Сталин в некоторых нюансах американского атомного проекта был осведомлён подробнее самого президента этой страны. Знал так же Сталин и о заявлениях ближайшего окружения Трумэна.

Заместитель госсекретаря Джозеф Грю в одном из своих секретных докладов сказал: «Если что-либо может быть вполне определенным в этом мире, так это будущая война между СССР и США». Вторил ему и Лесли Гровс: «Главное назначение нашего проекта – покорить русских».

Перед тем как окончательно решиться на бомбардировки Японии президент США поинтересовался у своих экспертов о времени появления атомной бомбы в СССР.

Эксперты были единодушны во мнении, что это может произойти не ранее чем через 10 – 15 лет. После этого было принято окончательное решение.

Сразу после взрывов в Хиросиме и Нагасаки в Пентагоне появились сверхсекретные **карты со схемами нанесения атомных ударов по нашей стране**, прежде всего по Москве и Ленинграду. На Москву было запланировано сбросить восемь бомб, на Ленинград всего семь.

После сообщения Сталину о бомбардировках Японии он сказал: «Располагая ядерным оружием в достаточном количестве, США обязательно воспользуются им, чтобы навсегда покончить с СССР. Но если мы тоже создадим его в ближайшее время, они подумают, стоит ли им применять эту «штучку» против нас».

Бомбардировки Японии придали немыслимое ускорение советскому атомному проекту. Темпы создания атомной бомбы начали развиваться ещё более стремительно, чем работы по Манхэттенскому проекту. Напряглась, практически, вся послевоенная страна.

Тем временем Пентагон, как стало известно нашей разведке, приступил к детальной разработке стратегического **плана «Троян», предусматривающего нанесение атомных ударов по семидесяти городам Советского Союза**. Ядерная атака планировалась на первые числа января 1950 г. Но, как показала история, этим планам не суждено было сбыться.

29 августа 1949 г. СССР стал вторым в мире обладателем атомного оружия.

Поскольку секрета атомной бомбы, как таковой, не существовало, а было очень много нерешённых частных задач по обеспечению этого проекта, то усилия всего большого коллектива учёных, конструкторов, инженеров и политических руководителей было направлено на решение этих задач.

Прежде всего, было необходимо организовать промышленное производство U^{239} и Pu^{239} . Срочно были необходимы опытный и промышленный реакторы, заводы по разделению диффузионным методом изотопов урана.

Недостаточный объём добычи урановой руды был компенсирован трофейным сырьём из Германии и стран Восточной Европы, с которыми СССР заключил соответствующие соглашения.

В 1945 г. в добровольно-принудительном порядке из поверженной Германии в Советский союз были переправлены около 300 немецких учёных специалистов, связанных с атомной проблематикой фашистской Германии.

Немцы были вывезены в Сухуми и размещены в санаториях «Синоп» и «Агудзеры», куда было доставлено оборудование из Института химии, Физического института кайзера Вильгельма и электротехнических лабораторий фирмы «Сименс».

В нашу страну были вывезены три из четырёх немецких циклотронов и большое количество специального физического оборудования, использовавшегося при проведении немецких атомных разработок. Позже в Сухуми на немецкой материальной базе был организован физико-технический институт.

На базе Кировского завода (Ленинград) были организованы два специальных опытно-конструкторских бюро по разработке оборудования для обогащения урана методом газовой диффузии.

На Среднем Урале в 1945 г. быстрыми темпами строился завод по производству металлического урана U^{235} . В этом же победном году начались работы по созданию тяжеловодных реакторов на природном уране.

На Южном Урале развернулось строительство крупного завода по производству плутония Pu²³⁹. Помимо заводских корпусов в окрестностях строился целый город, который в разное время назывался «Сороковка», «Челябинск-40», а сейчас это Производственное Объединение «Маяк», а город стал называться «Озёрск».

В конце 1945 г. началось строительство первого ядерного центра в г. Саров, известного, теперь как «Арзамас-16». На этом объекте начало работать

Конструкторское бюро №11, выделившееся из Лаборатории №2. В этом бюро продолжились работы по созданию образцов атомного оружия СССР. Под руководством И.В. Курчатова начали создаваться изделия РДС-1 и РДС-2. Технические задания на проектирование бомб были разработаны уже к 1 июля 1946 г.



Рис. 6.28. Изделие РДС-1

Бомба РДС-1 (рис. 6.28) должна была быть готова к наземным испытаниям к 1 января 1948 г., в авиационном исполнении – к 1 марта 1948 г.

Такой темп работ стал возможен вследствие самоотверженной работы учёных и специалистов, а так же имеющихся разведывательных данных об американских бомбах. Информация позволила учёным и конструкторам не напрягаться по реализации тупиковых вариантов.

В канун праздника 7 ноября 1947 г. министр иностранных дел М.В. Молотов сделал официальное заявление, о том, что для СССР секрета атомной бомбы уже не существует. Американские аналитики, однако, такое заявление рассматривали как блеф и по прежнему уверяли правительство США, что бомба у Иосифа Сталина может появиться теоретически только в 1954 г. А между тем, в декабре 1948 г. в СССР была получена первая промышленная партия оружейного плутония.

Описываемые выше события во многом зависели от куратора атомного проекта от правительства и ЦК КПСС Берии Лаврентия Павловича. Несмотря на обилие, во многом справедливого, негативного материала о деятельности этого человека, отрицать его положительную роль в развитии атомного проекта не совсем объективно. В этой связи представляют интерес воспоминания сына Берии, Серго, которые сочли возможным опубликовать только в 1994 г.

С. Берия вспоминает, что о взрыве в Аламогадро отец узнал ещё до встречи Сталина с Трумэнном и Черчиллем и не преминул тут же доложить Верховному Главнокомандующему. Сталин был во гневе и в присущей ему резкой форме потребовал у Л.П. Берии срочного доклада о состоянии дел.

Берия связался с Курчатовым и поинтересовался последними новостями. После Потсдамской конференции Сталин постоянно с пристрастием расспрашивал Берию о ходе работ по атомной бомбе и постоянно заставлял взвинчивать темпы.

Сталин торопился и торопил своё ближайшее окружение. Все, включая Берию, понимали, что в случае неудачи или срывания сроков наказание будет жестоким. Слишком много было поставлено в то время на кон. Отсутствие запаса времени заставляло отечественных учёных использовать любые возможности ускорения работ, включая и данные разведывательного характера.

Как вспоминал Юлий Борисович Харитон, один из главных создателей отечественной атомной бомбы, вклад разведчиков в советский атомный проект был, значим. Прежде всего, поступающая информация подтолкнула принятие важных правительственных решений, трудных решений, учитывая военное состояние, о

развёртывании работ по созданию атомного оружия. Сведения, поступающие из-за рубежа, позволили нашим учёным максимально сократить риски при выборе технологий, приблизив тем самым конечные этапы работ.

Стараниями разведки Курчатов был, пожалуй, самым осведомлённым в мире человеком по состоянию дел в атомной промышленности мира. А это очень дорогого стоит.

Однако, не стоит забывать, что любая информация начинает иметь значение и цену только в том случае если далее следуют какие-то действия, произведённые на основе этой информации.

Сейчас много пишется о том, что прототипом первой советской атомной бомбы была американский плутониевый заряд. А как могло быть иначе? Стана в разрухе, многомиллионные людские потери, причём наиболее работоспособного населения. На пороге стоят новые угрозы безопасности страны, тут не до щепетильности в выборе средств. Бомба была нужна любой ценой, причём как можно быстрее. После взрыва изделия РДС-1 Сталин сказал: **«Если бы мы опоздали на один – полтора года с атомной бомбой, то, наверное, "попробовали" бы ее на себе».**

Атомный проект СССР не мог закончиться успехом, если бы в нём не участвовали блистательные ученые и организаторы самого высокого мирового уровня, к числу которых, прежде других, следует отнести Игоря Васильевича Курчатова.

Курчатов обладая широчайшим научным кругозором и уникальными организаторскими способностями. Только Курчатов силой своих убеждений мог в короткий срок переориентировать целые научные коллективы на работы по новым для них направлениям. С промышленными объектами было проще. Достаточно было приказа свыше. А учёные привлекались для творческой работы, которую по приказу выполнять можно, но это будет не эффективно.

Помогал делу и высокий авторитет Курчатова в правительстве, как при И.В. Сталине, так и при Н.С. Хрущёве. Курчатов умел отстаивать интересы дела и его исполнителей в самых высоких государственных сферах, с одной стороны и быть терпимым к проявлениям некомпетентности, если она не очень мешала ходу, возглавляемого им процесса.

Так, например, когда один из заместителей Берии, генерал Махнев предложил шифры первых атомных изделий, то Курчатов отнёсся к этому философски, несмотря на их нелепость с точки зрения здравого смысла. РДС, по предложению генерала означало – «Ракетный двигатель Сталина». Кстати и американские военные разнообразием мышления тоже не отличались. В своих секретных документах первые атомные советские бомбы они зашифровали, как «Джо-1» и «Джо-2».

Сохранения режима секретности иногда доходило до комичных пределов. Известна история о сверхбыстрой публикации статьи немецких физиков О. Гана и Ф. Штрасмана об открытии деления ядер урана.

Долгое время считалось, что мгновенная публикация результатов явилась следствием стечения случайных обстоятельств. Когда некоторые завесы секретности с атомных программ были сняты, выяснилось, что акция о быстрейшем знакомстве мировой научной общественности с достижениями немецких физиков представляла собой прекрасно организованную акцию английской разведки.



Рис. 6.29. Ю.Б. Харитон

Оказалось, что директор издательства журнала «Натурвиссеншафтен» был глубоко законспирированным агентом английской разведки. Публикация статьи учёных имела своей целью обратить внимание правительств и учёных на возникающую угрозу со стороны Германии.

Если в первом варианте советской атомной бомбы можно было обнаружить американский след, то разрабатываемые параллельно образцы были совсем не похожи на прототипы РДС-1 и РДС-2. Параллельно с бомбами серии РДС в 1946 г. была начата разработка своей оригинальной конструкции плутониевой имплозионной атомной бомбы.



Рис. 6.230. Отечественная серийная атомная бомба

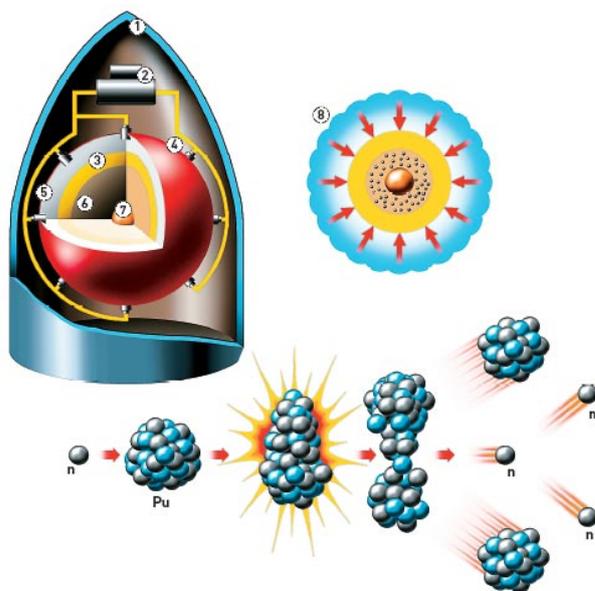


Рис. 6.31. Устройство отечественной атомной плутониевой бомбы

правительственные награды. Им были присвоены звания Героев Социалистического труда и лауреатов Сталинской премии.

Учёные получили крупные денежные премии, автомобили «ЗИС-110» или «Победа», а так же для них были построены комфортабельные меблированные коттеджи за государственные средства.

Специальным постановлением Совета Министров детям учёных было предоставлено право бесплатного обучения в любом вузе СССР. Члены семей учёных имели право бесплатного проезда по территории государства на всех видах транспорта.

Новый атомный заряд был почти в два раза меньше по весу американского, но в два с лишним раза мощнее по параметрам взрыва. Конструкция изначально предусматривала авиационную транспортировку (рис. 6.30).

Проектирование новых образцов возглавляли Е.И. Забабахин, Л.В. Алтштуллер, К.К. Крупинников и Я.Б. Зельдович.

Этот заряд был успешно испытан в 1951 г. и сразу началось изготовление целой серии бомб, т.е., как говорится, плутониевое изделие пошло с некоторыми доработками в серию (рис. 6.31).

Заряд помещался в корпусе 1, помимо заряда там же размещался блок управления 2 системой зарядов 4, которые создавали сферическую взрывную волну 8, уплотняющую слои активного вещества и разделительных устройств 3.

После успешных испытаний атомного оружия 29 октября 1949 г. группа учёных АО главе с И.В. Курчатовым получила

6.4. Термоядерное оружие

Теоретическое вступление. Термоядерное оружие, как не трудно догадаться, основано на организации термоядерных реакций синтеза атомных ядер. Из всех известных естествоиспытателям реакций протекающих в окружающем мире, термоядерные реакции обладают наибольшим выделением удельной энергии, т.е. энергии, приходящейся на единицу массы.

Учёными установлено, что в природе термоядерные процессы распространены достаточно широко, в частности, они являются источником энергии звёзд. Наше Солнце – не исключение. В наше время Солнце является обычной звездой, в ядре которой протекают термоядерные реакции синтеза ядер гелия из ядер водорода.

Ежесекундно Солнце на реакцию синтеза расходует $6 \cdot 10^{11}$ кг водорода, с выходом $4 \cdot 10^9$ кг гелия. По прогнозам астрофизиков наблюдаемое сейчас состояние динамического равновесия нашей эволюционирующей звезды продлится около 5 млрд. лет.

Так, что поводов для тактического беспокойства пока нет. Интенсивность термоядерных реакций можно проследить на диаграмме Герцшпрунга – Рессела (рис. 6.32), где показана зависимость светимости звёзд от их температуры, которая одновременно является и показателем спектрального класса. Эту зависимость можно выразить уравнением, связывающим светимость и размеры звезды

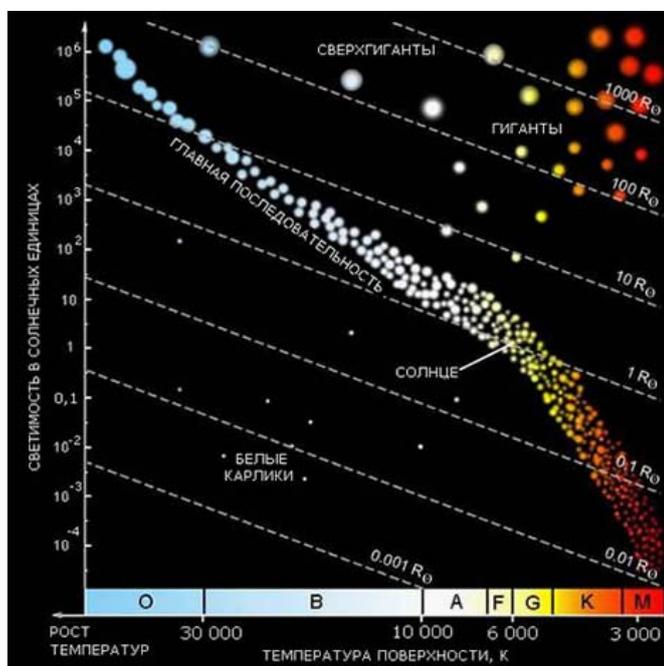


Рис. 6.32. Эволюция звёзд в зависимости от интенсивности ядерных реакций

$$L = R^{5,2}.$$

При образовании одного ядра гелия из двух ядер водорода выделяется энергия, равная 24 МэВ. Напомним, что 1 эВ – это энергия которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов, равную 1 В, $1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. В 1 кг дейтерия, изотопа водорода содержится $1,5 \cdot 10^{26}$ пар соединяющихся ядер.

Энергию, выделяющуюся из 1 кг дейтерия при синтезе гелия можно определить следующим образом

$$E_1 \approx 1,5 \cdot 10^{26} \cdot 24 \approx 3,6 \cdot 10^{27} \text{ МэВ} \approx 1,62 \cdot 10^8 \text{ кВт} \cdot \text{час}.$$

Как известно дейтерий в малых концентрациях содержится в воде. В пересчёте на среднюю концентрацию дейтерия из 1 л воды потенциально возможно получить энергию порядка 6100 кВт·час., что эквивалентно сжиганию 672 литров бензина,

при расходовании на реакцию окисления около восьми тонн кислорода. Для слияния двух ядер водорода в одно ядро гелия необходимо, чтобы эти положительно заряженные ядра преодолели кулоновские силы отталкивания

$$\vec{F}_k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{Ze_1 \cdot Ze_2}{r^3} \vec{r}.$$

Для слияния исходных ядер водорода необходимо их сблизить на расстояние соизмеримое с размерами ядра, т.е. на $\approx 3 \cdot 10^{-15}$ м. На этом расстоянии потенциальная энергия двух положительных зарядов (ядер водорода) будет равна

$$\Pi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{Ze_1 \cdot Ze_2}{r} \cong 7,68 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \cong 5 \cdot 10^5 \text{ эВ}.$$

Две заряженные частицы могут сблизиться на расстояние, соизмеримое с размерами ядра в том случае, если они будут иметь кинетическую энергию, превосходящую или равную половине потенциальной энергии взаимодействия. Из молекулярной физики известно, что кинетическая энергия структурных элементов материи при их хаотическом тепловом движении определяется температурой

$$K_0 = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} K_B T,$$

что даёт возможность оценить соответствующие термоядерному синтезу температуры

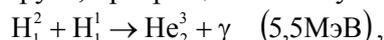
$$0,5K \geq \Pi; \quad \frac{1}{2}\Pi \geq K \geq \frac{3}{2}k_B T,$$

$$T \approx \frac{\Pi}{3k_B} \approx \frac{7,68 \cdot 10^{-14}}{3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-23}} \cong 1,83 \cdot 10^9 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

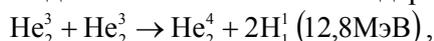
Температуры всего на два порядка ниже реализуются в течение короткого времени, при атомных взрывах и внутри звёзд. По последним данным космофизиков температура Солнца лежит в пределах $1,2 \cdot 10^7 - 1,5 \cdot 10^7$ °K. При таких относительно низких температурах возможен прямой захват протона протоном



При этом ядро He_2^2 является неустойчивым и быстро превращается за счёт позитронного распада в тяжёлый водород. Позитрон, сталкиваясь со своим антиподом – электроном, аннигилирует, превращаясь в излучение



Далее начинается взаимодействие нестабильных ядер гелия



которые превращаются в стабильную модификацию гелия. При превращении 1 кг водорода в 883 г гелия, $\Delta m \approx 7$ г вещества трансформируется в соответствии с уравнением Оливера Хевисайда в излучение

$$E \cong \Delta m \cdot c^2 \cong 7 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 6,3 \cdot 10^{14} \text{ Дж}.$$

Столько энергии освобождается при полном окислении $1,6 \cdot 10^{10}$ кг автомобильного бензина. Естественно такой энергетический выход не мог не заинтересовать венец Природы – человечество, которое в лучших традициях своего эволюционного пути нашло такой способ приспособить всю эту энергетическую эффективность исключительно для истребления себе подобных и иже с ними.

Дефект масс, открытый при исследованиях расщепления ядер, означает, в частности, что масса любого стабильного ядра меньше суммы масс составлявших его протонов и нейтронов. Например, масса изотопа гелия He_2^4 меньше суммы масс

двух протонов и двух нейтронов. Следовательно, если два протона и два нейтрона привести в соприкосновение, чтобы образовалось ядро гелия, то это слияние сопровождалось бы уменьшением массы. Уменьшение массы на Δm проявляется в выделении огромного удельного количества энергии ($\Delta E = \Delta mc^2$). Образование ядер в процессе объединения отдельных протонов и нейтронов или легких ядер как раз и называется **ядерным синтезом**.

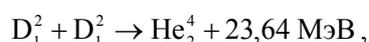
Для выяснения подробностей энергетического аспекта этого процесса обратимся вновь к данным рис.4.14, где приведена кривая изменения удельной энергии связи, т.е. энергия в расчете на нуклон. В силу отрицательного знака дефекта масс, слияние ядер тяжёлых элементов (правая ветвь кривой) будет сопровождаться выделением энергии.

Процесс будет в высокой степени **эндотермическим**, т.е. для его осуществления требуются значительные энергетические затраты. Реакция синтеза двух ядер урана, например, возможна только в том случае, если объединяющиеся ядра будут обладать, по меньшей мере, такой же энергией, сколько её высвобождается при делении каждого из них. Получение сверхтяжелых ядер весьма энергоёмкое и дорогостоящее предприятие, не возможное в настоящее время.

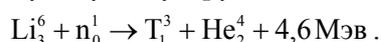
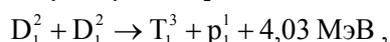
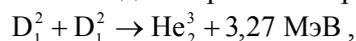
Синтез легких ядер, наоборот, приводит к такому дефекту масс, который связан с высвобождением значительных энергий связи. При объединении двух лёгких ядер имеет место экзотермический процесс.

При слиянии двух протонов и двух нейтронов в ядро гелия мы получаем выигрыш в энергии 28,2 МэВ, а для 1 кг синтезированного гелия это составит около $2 \cdot 10^8$ кВт·ч. Даже по сравнению с энергетикой деления ядер – впечатляет, весьма.

На первый взгляд, методика осуществления реакции синтеза ядер, кажется простой как амёба, действительно, чего проще, соединили два ядра дейтерия и, вот он – гелий:



причём, появление каждого нового ядра сопровождается выделением энергии 23,64 МэВ. Естественно предположить, что эта энергия равна разности между полной энергией связи ядра атома гелия (28,2МэВ), удерживающей вместе четыре нуклона, и полной энергией связи двух ядер тяжелого водорода (по 2,28МэВ каждый). Существует ряд других реакций, которые используются в работах по термоядерному синтезу. Они тоже внешне до неприличия просты



Слияние, например, двух ядер тяжелого водорода возможно, если их удастся сблизить до расстояния действия ядерных сил, т.е. до $\approx 3 \cdot 10^{-15}$ м. А для этого необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов в ядрах. Элементарный подсчет показывает, что на расстояниях такого масштаба электростатическая энергия отталкивания равна $\approx 0,1$ МэВ.

Единственное препятствие в организации термоядерной реакции в домашних условиях, состоит, в преодолении кулоновского отталкивания, поскольку протоны и другие легкие ядра всегда положительно заряжены.

Как показывают расчеты, два встречных сталкивающихся протона должны иметь кинетическую энергию порядка 250 кэВ каждый. Эту энергию невозможно получить путем обычного нагревания, так как даже при температуре 10^7 К энергия частицы едва достигает только ≈ 1 кэВ. А нагреть надо до температур поряд-

ка 10^9 °К, чтобы энергии движения частиц хватило на преодоление взаимного отталкивания ядер. При $T \cong 10^9$ °К они вступают в непосредственный контакт, и происходит объединение ядер. Реальная температура, необходимая для поддержания реакций синтеза несколько ниже расчётной и составляет порядка 10^8 °К, что обусловлено явлением туннельного эффекта.

Кроме того, согласно функции распределения Максвелла, многие частицы обладают энергиями значительно превышающими среднее значение $\langle E \rangle = kT$.

После второй мировой войны стало ясно, что при взрыве атомной бомбы имеют место температуры около 10^8 °К. **Возникла идея использовать атомную бомбу в качестве запала для водородной бомбы, реализующей ядерную реакцию синтеза.**

Получить неуправляемое выделение колоссальных количеств энергии при взрыве водородной бомбы, после того как уже набили руку на обычных ядерных взрывах, оказалось достаточно просто.

Термоядерная бомба, по сути, состоит из атомной бомбы и термоядерного заряда. Внутри оболочки, заполненной легкими элементами, способными вступать в реакцию синтеза, взрывается атомная бомба. На очень короткое время – миллионные доли секунды, температура внутри еще целой оболочки достигает нескольких сотен миллионов градусов (10^8 °К), а давление – сотен миллиардов атмосфер.

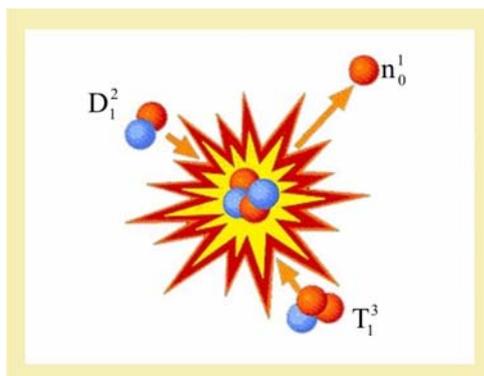
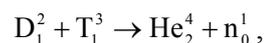


Рис. 6.33. Синтез ядер гелия

При таких экстремальных условиях начинается слияние ядер дейтерия и трития в ядро гелия



выделяется огромная энергия в очень короткое время, т.е. происходит взрыв (рис. 6.33). Энергия, выделяющаяся в реакции ядерного синтеза в расчете на данную массу горючего, больше, чем при делении ядра. Кроме того, при ядерном синтезе не столь остра проблема захоронения радиоактивных отходов.

В качестве горючего термоядерного реактора можно использовать дейтерий, в изобилии встречающийся в воде океанов. Из 60 литров океанской воды можно извлечь около 1г дейтерия.

Однако осуществить управляемый термоядерный синтез, т.е. не взрывоподобный отвод энергии технически оказалось весьма сложной задачей. Всё дело упёрлось в создание и поддержание достаточно продолжительное время необходимых для ядерного синтеза высоких температур.

Любое вещество при обсуждаемых температурах представляет собой особую среду, которая состоит из ядер и несвязанных с ними электронов. Это состояние вещества называется **плазмой**.

Если посмотреть в соответствующий раздел справочника по физическим свойствам веществ, то можно обнаружить, что из всего их множества наибольшей температурой плавления обладает карбид гафния $T_{пл} \cong 4000$ °К, даже в нём «содержать» высокотемпературную среду не представляется возможным.

Обычные материалы испаряются при температуре в лучшем случае 10^4 °К, следовательно, они не пригодны для термоядерных технологий. Но Природа – Мать распорядилась так, что плазма, имея огромное число свободных электронов, может пропускать электрический ток и реагировать на внешнее магнитное поле.

Водородная бомба. По одной из циркулирующих в прессе версий, история первого практического использования термоядерной реакции начинается в 1941г. Японский физик Хагивара из университета г. Киото, который не разбомбили в 1945 г. американцы по причине плохой видимости, в лекции своим студентам высказал идею о возможности возбуждения термоядерной реакции между ядрами водорода в условиях, создаваемых взрывом атомной бомбы на основе U^{235} .

В сентябре 1941 г. по другую сторону океана Энрико Ферми аналогичную идею высказал в беседе с Эдвардом Теллером (рис.6. 34). Идея Ферми захватила учёного, который стал последовательным и напористым инициатором разработки оружия такого типа.

Надо сказать, что эта идея обсуждалась и на закрытых семинарах физиками СССР уже сразу после развёртывания атомного проекта, по крайней мере не для Курчатова, не для Флёрова и других ядерщиков такая идея не являлась новостью.

До поры до времени просто не хватало времени и сил для её разработки на систематической основе. Развернулась атомная гонка, все усилия весьма ограниченных ресурсов, как интеллектуальных, так и материальных концентрировались на ней.

Идея «классического супера» была оформлена в виде набросков в Лос-Аламосе к концу 1945 г. Весной 1946 г. Клаус Фукс предложил при использовании в качестве запала атомной бомбы вынести смесь из дейтерия и трития и первичного взрывателя в прогреваемый излучением отражатель из окиси бериллия.

По сути это была идея ионизационной имплозии, которая должна была обеспечить условия термоядерного зажигания. Для удержания излучения в объёме заряда он закрывался непрозрачным кожухом.

В 1946 г. произошло рождение идеи радиационной имплозии. Схема предложенная Клаусом Фуксом, стала основой будущей конфигурации Теллера – Улама, которая вошла в современные хрестоматии по термоядерной технике (рис. 6.36).

Устройство состояло из двух функциональных частей В едином корпусе располагался атомный заряд в виде плутониевой сферической бомбы, который обеспечивал при срабатывании высокие значения температуры и давления и, собственно, термоядерного горючего, окрашенного на рисунке в вишнёвый цвет.

Современные специалисты по ядерной физике признают, что, опережающие время идеи немецкого физика Фукса стали основой многих последующих конструкций термоядерных устройств. Фукс и Фон – Нейман 28 мая 1946 г. подали заявку на изобретение новой схемы иницирующего отсека с использованием радиационной имплозии.



Рис. 6.34. Э. Теллер



Рис 6.35. Клаус Фукс

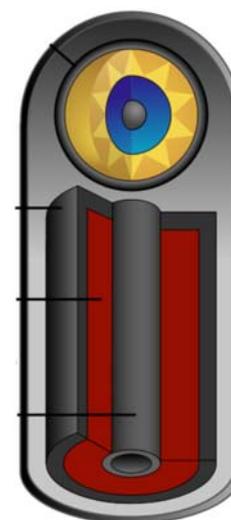


Рис. 6.36. Схема бомбы Теллера – Улама

Только спустя пять лет в США полностью осознали огромный идейный потенциал всех предложений Фука. В конце августа 1946 г. неутомимый Теллер обнародовал отчёт, в котором развил новую схему термоядерной бомбы под романтическим названием «Будильник».

Новая версия бомбы по предложению Теллера должна была состоять из чередующихся сферических слоёв делящихся материалов и термоядерного горючего, дейтерия, трития и их химических соединений.

Цепная реакция деления, возникшая в одном из слоёв, должна была за счёт большого количества быстрых нейтронов инициировать процессы деления в соседних слоях, что должно повышать энерговыделение, особенно тепловое.

Результат атомного взрыва должен был вызвать уплотнение активных делящихся элементов, т.е. объёмное сближения ядер исходного вещества. Плотность термоядерного горючего увеличивалась с возрастанием скорости термоядерных реакций.

Однако термоядерный заряд по этой схеме получался недопустимо габаритным, не позволяющим даже теоретически рассматривать его практическое использование. Некоторое время проекты «Классический супер» и «Будильник» разрабатывали специалистами Лос-Аламоса параллельно.

В январе 1950 г. президент США Гарри Трумэн выступил с публичным заявлением об официальном поручении учёным из Лос-Аламоса разработки водородной бомбы. Естественно, что работы в этом направлении стали проводиться более динамично.

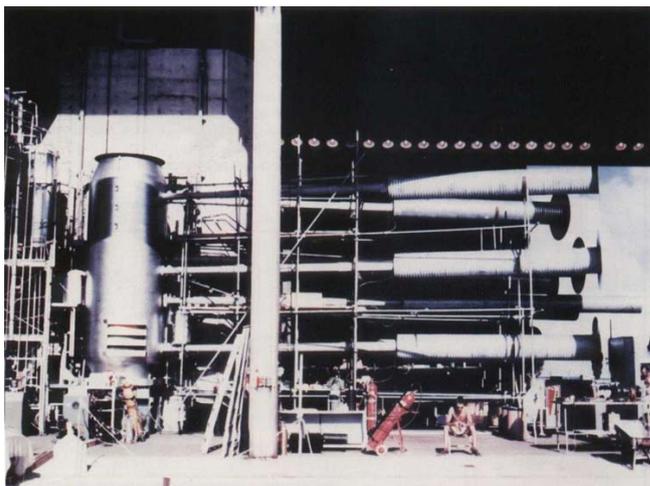


Рис. 6. 37. Термоядерный заряд Mike

В сентябре 1951 г. началась подготовка термоядерного заряда «Майк» к испытаниям, которые успешно были проведены 1 ноября 1952 г. Мощность взрыва составила 10 Мт в тротиловом эквиваленте. Это даже с натяжкой трудно было назвать оружием (рис. 6.37).

Полнейшая нетранспортабельность, габариты соответствовали приличных размеров двухэтажному строению. Продукты термоядерного деления поддерживались при температуре жидкого азота. Термо-

ядерный заряд, в этой связи, был снабжен стационарными рефрижераторными установками, способными во время монтажа и испытаний поддерживать сверхнизкие температуры.

В СССР до 1945 г. возможности официально заниматься вопросами термоядерного синтеза, кроме рассмотрения теоретических аспектов, небыло. Страна воевала и в ускоренных темпах создавала атомную бомбу, напрягаясь из всех мыслимых и немыслимых сил.

Первый официальный документ по термоядерному оружию относится к 22 сентября 1945 г., его подготовил на имя И.В. Курчатова учёный – ядерщик Яков Ильич Френкель, где теоретически обосновал возможность протекания термоядерных реакций у условиях взрыва атомной бомбы: «...Представляется интересным использовать высокие – миллиардные – температуры, развивающиеся при взрыве

атомной бомбы, для проведения синтетических реакций (например, образование гелия из водорода), которые являются источником энергии звёзд и которые могли бы ещё более повысить энергию, освобождаемую при взрыве основного вещества (уран, висмут, и т.д.)».

Направляя записку Курчатову, учёный не мог знать, что вопросы термоядерных реакций уже давно обсуждаются создателями атомного оружия и что Курчатов владеет полной информацией о состоянии дел по термоядерной тематике в Лос-Аламосе.

В сентябре 1945 г. по каналам внешней разведки Курчатову поступил материал об американских работах по комбинированию атомной бомбы пушечного типа на основе U^{235} с отражателем из окиси бериллия, промежуточной камеры с дейтерий тритиевой смесью и цилиндра с жидким дейтерием.

Открытая информация о возможности создания сверхбомбы появилось в Британской газете «Таймс» 19 октября 1945 г. за долго до испытания термоядерных зарядов в США.

Естественно, что такие сообщения не могли остаться без внимания высших руководителей СССР и ведущих учёных, занятых в атомных программах. Л.П. Берия поручил дипломатам уточнить информацию.

Обратились к Нильсу Бору, который только что вернулся в Данию из США. Бор посчитал необходимым всех успокоить: «Что значит сверхбомба? Это или бомба большего веса, чем уже изобретенная, или бомба, изготовленная из какого-то нового вещества. Что же, первое возможно, но бессмысленно, так как, повторяю, разрушительная сила бомбы и так очень велика, а второе, я думаю, что нереально». Несмотря на несомненный авторитет в области атомной физики, Бору у нас в стране не поверили.

По настоянию Берии руководитель атомной программы Курчатов дал поручение ведущим специалистам Ю.Б. Харитону, Я.Б. Зельдовичу, И.И. Гуревичу и И.Я. Померанчуку рассмотреть в теоретическом плане вопрос о возможности освобождения энергии лёгких элементов и представить свои выводы на заседании Технического

Тем не менее И.В. Курчатов обратился к Ю.Б. Харитону с поручением рассмотреть вместе с И.И. Гуревичем, Я.Б. Зельдовичем и И.Я. Померанчуком вопрос о возможности освобождения энергии лёгких элементов и представить соображения по этому вопросу на заседании Технического совета Специального комитета.

Соображения И.И. Гуревича, Я.Б. Зельдовича, И.Я. Померанчука и Ю.Б. Харитона были изложены в отчёте „Использование ядерной энергии лёгких элементов“, материалы которого были заслушаны на заседании Технического совета 17 декабря 1945 года.

Докладчиком был Я.Б. Зельдович. В основе подхода к решению проблемы в отчёте и докладе было представление о возможности возбуждения ядерной детонации в цилиндре с дейтерием при осуществлении неравновесного режима горения.



Рис. 6.38 Я.И. Френкель

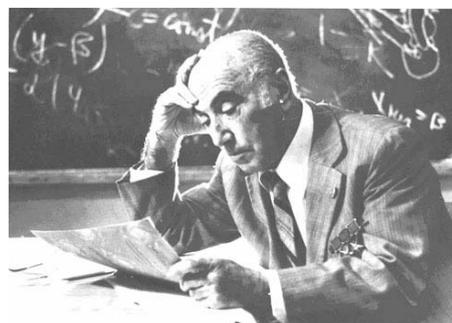


Рис. 6.39 Я.Б. Зельдович

Рассмотренный на заседании отчёт полностью опубликован в журнале «Успехи физических наук» № 5 за 1991 год. По докладу Я.Б. Зельдовича на заседании Технического совета 17 декабря 1945 года было принято решение, которое касалось только измерений сечений реакций на лёгких ядрах и не содержало поручений, относящихся к организации и проведению расчётно-теоретических исследований и работ по сверхбомбе.

Тем не менее в июне 1946 года группа теоретиков Института химической физики АН СССР в составе А.С. Компанейца и С.П. Дьякова под руководством Я.Б. Зельдовича в рамках программы исследований вопросов ядерного горения и взрыва начала теоретическое рассмотрение возможности освобождения ядерной энергии лёгких элементов.

В то время, как группа Я.Б. Зельдовича проводила свои исследования, в СССР в 1946–1947 годах продолжали поступать разведывательные сообщения информационного характера, касающиеся работ в США по сверхбомбе. К ним добавились и новые сообщения в открытой печати, в том числе статья Э. Теллера в февральском номере «Бюллетеня ученых-атомщиков» за 1947 год.

28 сентября 1947 года в Лондоне состоялась первая встреча К. Фукса, вернувшегося из США в Англию, с представителем советской разведки А.С. Феклисовым. А.С. Феклисов обратился к К. Фуку с 10-ю вопросами, первый из которых относился к сверхбомбе.

Из отчёта о встрече А.С. Феклисова с К. Фуком 28 сентября 1947 года следует, что К. Фукс устно сообщил о том, что теоретические работы по сверхбомбе проводятся в США под руководством Э. Теллера и Э. Ферми в Чикаго.

К. Фукс описал некоторые конструкционные особенности сверхбомбы и принципы её работы, отметил использование наряду с дейтерием трития. К. Фукс устно сообщил, что к началу 1946 года Э. Ферми и Э. Теллер доказали, что такая сверхбомба должна эффективно действовать. Однако А.С. Феклисов, не будучи физиком, смог воспроизвести конструкционные особенности сверхбомбы и её работу весьма приближённо. Начались ли в США практические работы по созданию сверхбомбы и каковы их результаты, К. Фуку было неизвестно.

В июне 1948 г. Советом Министров СССР было принято постановление № 1989 – 773 «О дополнении плана работ КБ-11» в котором, в частности, предписывалось лаборатории ядерной физики, совместно с Физическим институтом АН СССР провести теоретическую и экспериментальную проверку возможностей создания водородной бомбы, которая в документах получила шифр РДС-6.



Рис. 6.40. Сахаров А.Д.

С материалами по американским разработкам был знаком только И.В. Курчатов, который не стал знакомить с ними своих сотрудников.

Чтобы не стеснять свободы поиска альтернативных решений. И они не замедлили последовать.

Сахаров Андрей Дмитриевич совместно с Яковом Борисовичем Зельдовичем предложили схему комбинированной бомбы, в которой дейтерий используется в смеси с U^{238} . Другими словами, независимо от Э. Тейлера отечественные учёные пришли к идее гетерогенной бомбы, как она стала называться среди разработчиков «Слойка», в которой предполагалось использовать принцип ионизационного сжатия термоядерного горючего.

Игорь Евгеньевич Тамм, руководитель А.Д. Сахарова по аспирантуре, в ноябре 1948 г. обратился с письмом к директору Физического института АН СССР Вавилову С.И., в котором сообщал, что руководимая им группа физиков нашла принципиальную возможность нового способа использования детонации дейтерия, основанного на особом способе его сочетания с тяжёлой водой и природным ураном U^{238} . В этом же письме предлагалось для осуществления термоядерной реакции использовать схему



где в качестве термоядерного оружия используется дейтерит лития-6.

Сахаровым была предложена схема дополнительного заряда плутония для предварительного сжатия «слойки». Это был принцип двухступенчатой конструкции термоядерной бомбы.

В США, как известно, 1 марта 1954 г. был проведен мощный термоядерный взрыв, свидетельствующий, что термоядерная программа конкурентов из теоретической стадии перешла в практическую плоскость.

Это придало нашим учёным и политикам новые силы. Буквально в первых числах апреля 1954 г. В КБ-11 был открыт новый принцип построения термоядерной бомбы.

Разработка технического задания на новое термоядерное изделие РДС-37. В июле 1955 г. был выпущен отчёт с обоснованием конструкции изделия РДС-37.

Авторами отчёта являлись: Е.Н. Аврорин, В.А. Александров, Ю.Н. Бабаев, Г.А. Гончаров, Я.Б. Зельдович, В.Н. Климов, Г.Е. Клинишов, Б.Н. Козлов, Е.С. Павловский, Е.М. Рабинович, Ю.А. Романов, А.Д. Сахаров, Ю.А. Трутнев, В.П. Феодоритов, М.П. Шумаев, В.Б. Адамский, Б.Д. Бондаренко, Ю.С. Вахрамеев, Г.М. Гандельман, Г.А. Дворовенко, Н.А. Дмитриев, Е.И. Забабахин, В.Г. Заграфов, Т.Д. Кузнецова, И.А. Курилов, Н.А. Попов, В.И. Ритус, В.Н. Родигин, Л.П. Феоктистов, Д.А. Франк-Каменецкий, М.Д. Чуразов. Среди авторов были математики: И.А. Адамская, А.А. Бунатян, И.М. Гельфанд, А.А. Самарский, К.А. Семендяев, И.М. Халатников, которые под руководством М.В. Келдыша и А.Н. Тихонова проделали огромную работу по теоретическому обеспечению проекта.

В ноябре 1955 г. было проведено предварительное испытание одноступенчатого термоядерного устройства, а 22 ноября 1955 г. бл успешно проведён подрыв двухступенчатого термоядерного заряда, оформленного как авиационная бомба (рис. 6.42).

Как сказал после испытания А.Д. Сахаров: «Испытание было завершением многолетних усилий, триумфом, открывшим пути к разработке целой гаммы изделий с разнообразными высокими характеристиками (хотя при этом встретятся ещё не раз неожиданные трудности)».

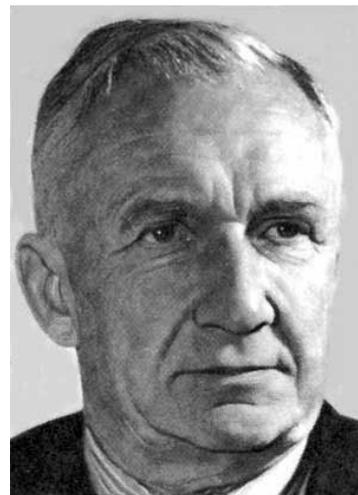


Рис. 6.41. И.Е. Тамм



Рис. 6.42. Изделие РДС-37

Таким образом был успешно завершён очередной этап создания термоядерного оружия, при этом достигнуты следующие результаты:

- Учёные СССР первыми в мировой практике (1952 г) применили высокоэффективное термоядерное горючее дейтерид лития Li^6 . В США применение этого материала относится к началу 1956 г.;
- Отечественные учёные уже в стадии первых испытаний достигли высокой точности совпадения теоретических параметров термоядерного взрыва с наблюдаемыми на практике характеристиками;
- Уровень теоретического обоснования конструкции был настолько высок, что стало возможным при экспериментальных взрывах искусственно занижать мощность, с целью снижения влияния на окружающее пространство;
- В двух испытаниях 1955 г. впервые был осуществлён сброс термоядерных зарядов с борта серийных бомбардировщиков ТУ-16.



Рис. 6.43. Бомбардировщик ТУ-95 в момент начала бомбометания



Рис. 6.44. Термоядерная отечественная бомба мощностью 100 МВт

После этого испытания пришло понимание, что созданное оружие предназначено не для войны за жизнь – оно предназначено для уничтожения жизни.

Очевидно, именно после этого взрыва политическим лидерам «атомных» держав стала ясна бессмысленность дальнейшего наращивания «термоядерных мускулов». Оружия уже вполне хватало, чтобы в одночасье покончить со многими проблемами современной цивилизации.

30 октября 1961 г. над Новой Землёй на высоте 4000 м над поверхностью земли была взорвана самая мощная в мире термоядерная бомба с тротильным эквивалентом 50 МГт.

Бомба была сброшена с бомбардировщика ТУ-95 (рис.6.43). Экипажем командовал майор Дурновцев А.Е.

Такого ещё на планете не происходило. Несмотря на то, что подорван был половинный заряд, вспышку в условиях облачности было видно на расстоянии тысячи километров.

Это был акт разовой силовой демонстрации, сопутствовавшей конкретным обстоятельствам политической кухни, „большой игре“ на устрашение между сверхдержавами.

Это было единичное изделие, конструкция которого при полной „загрузке“ ядерным горючим и при сохранении тех же габаритов позволяла достигнуть мощности даже в 100 мегатонн. Столь ужасающий взрыв в боевых условиях мгновенно породил бы огненный смерч, который охватил бы территорию огромной площади.

7. Природа и цивилизация

7.1 Солнце

Трудно найти во всей Вселенной другой космический объект, от которого в такой же степени, как от Солнца, зависело бы состояние нашей планеты. Прежде всего это объясняется тем, что ближайшая к Земле звезда снабжала, снабжает и еще долго будет снабжать планету энергией.

Солнце как физический объект постоянно находилось под пристальным вниманием людей на протяжении всей истории человечества. В далекие, так называемые, языческие времена во многих религиях мира Солнце почиталось одним из главных богов, что, собственно, не является удивительным, потому что оно с завидным постоянством проливает на небеса и земную твердь свои животворные лучи, обеспечивая юные цивилизации светом и теплом.

Чем больше человек узнавал о Солнце, тем больше понимал, насколько все земные процессы зависят от состояния звезды. Особенно очевидным это стало в последние десятилетия, когда многие исследования были перенесены в космос и появился интерес к особенностям физических процессов на Солнце. Вызвано это целым рядом объективных обстоятельств.

Во-первых, проведенные космические и наземные наблюдения показали, что процессы, протекающие как в самом Солнце, так и в околосолнечном пространстве не уникальны во Вселенной. Они весьма характерны для других космических объектов.

Солнце является ближайшей к Земле звездой, находящейся на расстоянии примерно 149,6 млн. км. Электромагнитная волна, распространяющаяся, как известно, со скоростью света $c \cong 3 \cdot 10^8$ м/с, путешествует от Солнца к Земле около 500 с, т. е. немногим более 8 мин.

Следующей по близости к Земле звездой является Проксима Центавра, свет которой достигает поверхности нашей планеты за 4,3 года. Почувствуйте, как говорится, разницу. Такая относительная близость Солнца позволяет отслеживать все происходящие на нем процессы, можно сказать, в реальном масштабе времени и наблюдать звезду с помощью современных телескопов не в виде точки, а в виде диска.

Солнце с позиций науки представляется уникальной естественной лабораторией, дающей возможность ставить целенаправленные эксперименты по изучению основополагающих проблем космофизики, физики плазмы, ядерной физики, магнитной гидродинамики, космологии и физики элементарных частиц.

Во-вторых, Солнце является уникальным и единственным астрофизическим объектом, который в высшей степени безразличен обитателям Земли. Солнце способствовало появлению всех живых организмов на нашей планете и является одновременно источником многих видов энергии, используемой современной цивилизацией. Непрерывное и неумное пока увеличение энергетических порождает це-

льный ряд глобальных проблем и делает приоритетной проблему прямого использования солнечной энергии, которая излучается с поразительным постоянством миллиарды лет.

Каждый квадратный метр поверхности Солнца в энергетическом отношении можно сравнить с электростанцией мощностью $6 \cdot 10^4$ кВт. Овладение технологиями прямого использования солнечной энергии сулит человечеству устранение или, по крайней мере, смягчение нависшего над цивилизацией энергетического кризиса [8].

Солнце в его наблюдаемом в настоящее время состоянии проявилось примерно 6–7 млрд. лет назад, в то время как возраст Земли составляет около 4,6 млрд. лет. Солнце является рядовой звездой Вселенной и занимает промежуточное состояние между красным гигантом и белым карликом.

Некоторые физические характеристики Солнца приведены в табл. 1.1, из которой можно составить представление о временных, геометрических и энергетических параметрах звезды.

Таблица 7.1

Радиус	$6,96 \cdot 10^8$ м
Масса	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Средняя плотность	1 410 кг/м ³
Ускорение силы тяжести на поверхности	273,98 м/с ²
Полное излучение	$3,826 \cdot 10^{26}$ Дж/с
Скорость освобождения на поверхности	617,7 км/с
Линейная скорость вращения на экваторе	2,025 км/с
Период синодического вращения на экваторе	27,275 суток
Период сидерического вращения на экваторе	25,38 суток

Солнце представляет собой плазменный шар радиусом $R_S \cong 6,96 \cdot 10^5$ км, что в 109 раз превышает радиус Земли. Масса Солнца $M_S = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг, что в 333 000 раз больше массы нашей планеты. Масса Солнца составляет 99,866% массы всей Солнечной системы. Средняя плотность солнечного вещества $\rho_S = 1,41 \cdot 10^3$ кг/м³, средняя плотность Земли, таким образом, в 3,91 раза больше средней плотности Солнца. Ускорение свободного падения на уровне видимой поверхности $g_S = 274$ м/с².

Плотность Солнца неодинакова по объему. Масса звезды и ее размеры дают основание полагать, что в центральных областях вследствие гравитационного сжатия плотность солнечного вещества должна достигать величин порядка $\rho_S \cong 1,5 \cdot 10^5$ кг/м³. При этом температура вещества должна быть не ниже $T \cong 1,4 \cdot 10^7$ К. Только в таких условиях внутреннее давление газа способно уравновешивать давление, обусловленное гравитационным сжатием.

Столь высокая температура может поддерживаться на протяжении длительного времени реакциями термоядерного синтеза, которые, по сути, и являются основным энергетическим источником. Ученые считают, что выделение термоядерной энергии происходит вследствие превращения ядер водорода в ядра гелия.

Реакции ядерного синтеза сопровождаются излучением в широком частотном диапазоне: от γ -квантов до излучения на радиочастотах, включая длины волн рентгеновского, ультрафиолетового, оптического и инфракрасного диапазонов.

Образование ядер гелия из ядер водорода сопровождается уменьшением общей массы вещества примерно на 0,7%, которая преобразуется в энергию в соответствии с формулой Эйнштейна $\Delta E = \Delta mc^2$. Если бы Солнце состояло из водорода, который весь бы превратился в гелий, то его масса уменьшилась бы на величину

ну $\Delta M_S \cong 0,07 M_S \cong 1,4 \cdot 10^{28}$ кг с высвобождением энергии $\Delta E = 1,26 \cdot 10^{45}$ Дж.

Гравитационное сжатие разогревает внутреннее солнечное вещество до температуры около 10^7 К, что вполне достаточно для возникновения реакций термоядерного синтеза более тяжелых элементов из легких. По современным спектроскопическим данным, Вселенная состоит примерно из 69% водорода и 30% гелия. На долю всей остальной таблицы Д.И. Менделеева приходится всего около 1% ее массы.

В настоящее время Солнце каждую секунду излучает в пространство энергию $L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}$ Дж/с, теряя при этом массу $\Delta m \cong \Delta E/c^2 = 4,26 \cdot 10^9$ кг. Если сравнить массу Солнца с массой вещества, излучаемого за год, то получится достаточно показательная величина:

$$\xi = \frac{M_S}{\Delta m \tau} \cong \frac{2 \cdot 10^{30}}{4,26 \cdot 10^9 \cdot 3,15 \cdot 10^7} \cong 1,49 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{год}},$$

что говорит о ничтожности излучаемой Солнцем массы по сравнению с общей массой звезды.

При сохранении темпов излучения энергии все запасы водорода на Солнце израсходуются за промежуток времени

$$\Delta \tau = \frac{\Delta M_S \cdot c^2}{L_{\odot}} \cong \frac{1,26 \cdot 10^{45}}{3,83 \cdot 10^{26}} \cong 3,29 \cdot 10^{18} \text{ с} \cong 1,04 \cdot 10^{11} \text{ лет}.$$

что не вызывает тревоги по поводу пришествия конца света, по крайней мере, по этому параметру. Энергии хватит всем и, что особо радует, надолго, несмотря на то что каждую секунду масса Солнца уменьшается на 4 млн. т.

Древнегреческие мыслители, например Аристотель, были абсолютно уверены в том, что небо в целом неизменно. Они считали, что изменения происходят только на Земле, а все, что находится в небе, является абсолютно совершенной и неизменной субстанцией. Были, конечно, некоторые небесные изменения. Примерно 25 комет за сто лет можно было наблюдать с поверхности Земли невооруженным глазом. Все тот же Аристотель объяснял эти явления несовершенством подлунного мира, т. е. процессами, протекающими в пределах Земли.

Первым, кто официально усомнился в такой постановке вопроса, был датский астроном Тихо Браге, который, измерив в 1577 г. параллакс одной из видимых комет, обнаружил, что относительно Земли она расположена гораздо дальше Луны. Это никак не согласовывалось с меморандумом о совершенстве и неизменности неба.

Появление новых звезд отмечали и до Тихо Браге, но значения этому не придавали. Известно, что Гиппарх в 134 г. с. л. обнаружил новую звезду в созвездии Скорпиона и даже попытался составить звездную карту для более удобной регистрации новых проявлений изменения небес.

А еще раньше, в 1054 г. до н. э., в созвездии Тельца обнаружилась звезда, которая по яркости превосходила Венеру, и ее можно было наблюдать даже в дневное время. Это уникальное явление в течение нескольких недель наблюдали китайские и японские астрономы, о чем имеются письменные свидетельства, дошедшие до наших дней.

Европейская астрономия, пребывавшая по известным причинам в состоянии, близком к упадку, начала проявлять активный интерес к событиям на небе только в эпоху Возрождения.

В 1572 г. Тихо Браге наблюдал появление новой звезды и описал свои исследования в книге «De Nova Stella». После изобретения телескопа астрономы с завидным постоянством начали обнаруживать на небе появление и исчезновение звезд.

Было установлено, что все звезды имеют свой «жизненный цикл» – от состояния красного гиганта до белого карлика, который можно проследить по яркости их светимости.

Солнце, изменяя свою поверхностную температуру, будет переходить в другой спектральный класс – из желтого в красный. Солнце в настоящее время находится в средней части главной последовательности, на которой располагаются стабильные звезды с термоядерными источниками энергии. Такие звезды практически не изменяют своей светимости на протяжении многих миллиардов лет, что тоже не может не радовать.

Полное количество излучаемой Солнцем энергии определяется солнечной постоянной, т. е. количеством энергии, проходящей в течение единицы времени через единичную площадку, расположенную вне атмосферы, на усредненном расстоянии между Солнцем и Землей. Эта величина J_S составляет $1,4 \cdot 10^3$ Вт/м². Если величину солнечной постоянной умножить на астрономическую единицу, т. е. на расстояние между Солнцем и Землей, то получится мощность солнечного излучения (светимость) L_{\odot} , которая составляет $3,83 \cdot 10^{26}$ Вт.

Излучение солнечной энергии исходит из относительно тонкого слоя – так называемой фотосферы, толщина которой составляет всего около $1/2\ 000 R_S \cong 350$ км. Тепловое излучение Солнца с достаточной степенью точности соответствует излучению абсолютно черного тела, находящегося при температуре 6 000 К.

Верхняя часть фотосферы абсолютно прозрачна для некоторых частот излучения, имеющего непрерывный спектр, некоторые же полосы частот поглощаются солнечным веществом. Фотосфера в основном состоит из водорода. Атомы других элементов составляют всего лишь $1/1\ 000$ часть от общего количества атомов. В областях фотосферы с температурами около 4 000 К образуются в незначительных количествах молекулы CH_2 , CN и др. (рис. 7.1).

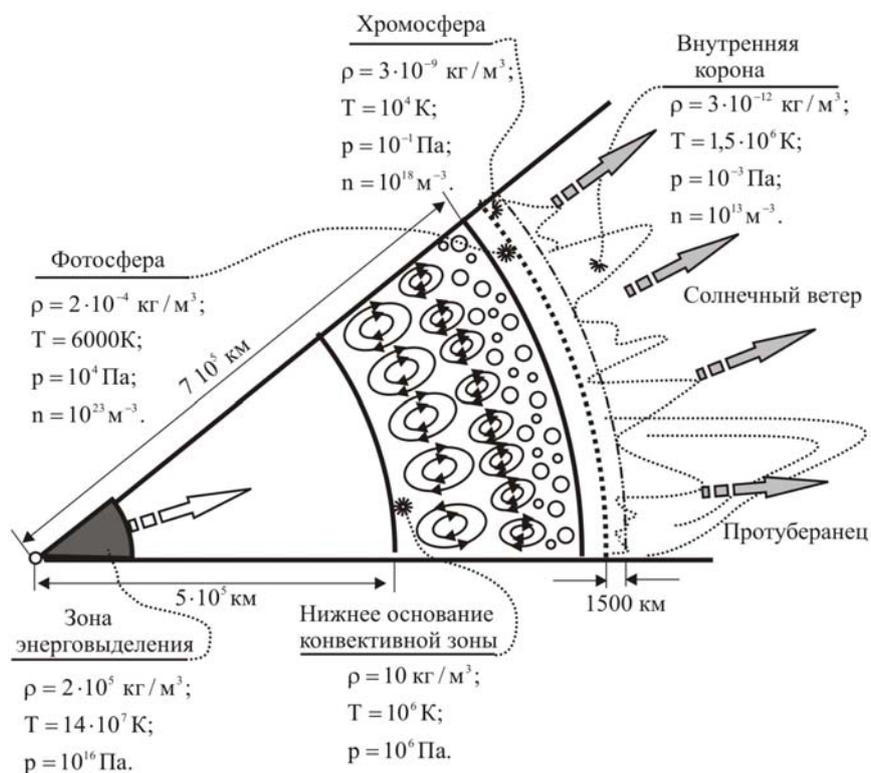


Рис. 7.1. Физические характеристики Солнца

Практически вся излучаемая Солнцем энергия заключена в диапазоне длин волн от $\lambda_{\min} = 1\ 500\ \text{А}$ до $\lambda_{\max} = 0,5\ \text{см}$. Поскольку диапазон излучаемых частот определяется температурой и физическими свойствами вещества, то анализ солнечного излучения дает основание полагать, что атмосфера имеет слоистое строение.

Солнечная поверхность – фотосфера – обнаруживается телескопом в виде совокупности ярких площадок, которые называются солнечными гранулами. Их средние размеры достигают 700 м, а время сохранения формы гранул колеблется от 5 до 15 мин. Разница температур в отдельных участках гранулированной поверхности составляет примерно 500 К.

На фоне гранул время от времени возникают солнечные пятна и факелы, время жизни которых колеблется от 30 до 60 мин. Температура пятен ниже, чем гранул, и составляет около 4500 К. Пятна являются источником ионизированных молекул газа, которые, взаимодействуя с магнитным полем Солнца, образуют фотосферные факелы протяженностью до 50 000 км и продолжительностью «жизни» в несколько месяцев. В годы максимальной активности Солнца факелы могут занимать до 10% всей поверхности звезды. Яркость факелов на 10–20% превышает общий фон.

Помимо волнового излучения Солнце генерирует частицы. Наблюдаемая при затмениях корона обусловлена рассеянием света на свободных электронах и межпланетной пыли. В основании короны концентрация свободных электронов составляет величину $n_e \cong 3 \cdot 10^{14}\ \text{м}^{-3}$. В пределах короны располагаются сравнительно холодные участки с концентрацией частиц $n \cong 10^{17}\ \text{м}^{-3}$ и температурой $T \cong 10^4\ \text{К}$ – протуберанцы, имеющие протяженности порядка $0,33\ R_{\odot}$. Протуберанцы, являясь основным свидетельством проявления солнечной активности в ее атмосфере, имеют форму дуг, воронок и т. п. (рис. 7.2).



Рис. 7.2. Протуберанец

Ежедневное воздание почестей Солнцу жрецами Египта, Вавилона и многими другими служителями культа в тех странах, где оно почиталось Богом, с позиций современной науки не представляются абсолютно абсурдными. А то, что Солнце представляет собой неодушевленный плазменный раскаленный до нескольких миллионов градусов огромный шар, не является причиной для меньшего его почитания, потому что все живое на Земле, как отмечено выше, своим возникновением и развитием обязано Солнцу. Это ли не проявление божественной силы в понимании наших пращуров?

С незапамятных времен люди установили, что состояние Солнца не является стабильным. Более 4 000 лет назад жрецы измеряли период обращения нашей планеты вокруг Солнца и установили на основе таких измерений продолжительность года и суток. По результатам наблюдений древние астрономы научились предсказывать солнечные затмения.

История инструментальных наблюдений Солнца начинается с Галилео Галилея (1564–1642 гг.), который с помощью изготовленного им телескопа в 1611 г. впервые осознанно упомянул о солнечных пятнах.

В 1814 г. Йозеф Фраунгофер (1787–1826 гг.), проводя спектроскопические наблюдения светила, обнаружил темные линии поглощения в спектре Солнца. Изу-

чение спектров поглощения и спускания Солнца послужило основанием для выводов о химическом составе ближайшей к нам звезды.

С 1836 г. ученые начали регулярно вести наблюдения предсказанных астрономией затмений Солнца, что привело их к обнаружению короны и хромосферы звезды, а также солнечных протуберанцев – одним словом, всего того, что объединено понятием «солнечная активность».

С появлением астрономических инструментов было установлено, что количество солнечных пятен изменяется с периодом примерно в 11 лет. О цикличности солнечной активности впервые написал немецкий астроном-любитель Генрих Самуэль Швабе (1789–1875 гг.). На рис. 7.3 приведена зависимость относительного числа пятен в период с 1850 по 1940 гг.

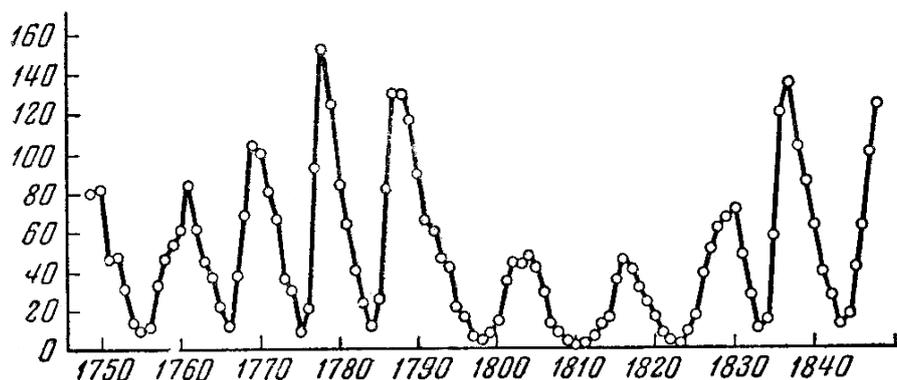


Рис. 7.3. Периодичность изменения числа пятен на Солнце

Как видно из приведенных данных, периодическое изменение количества солнечных пятен с одиннадцатилетним периодом не вызывает сомнения. Солнечные пятна, солнечные вспышки, факелы, протуберанцы и коронарные лучи во многом влияют практически на все происходящие на Земле процессы – от планетарных атмосферных явлений до поведения человека и животных.

Как правило, их объединяют в одно понятие – активность Солнца. К настоящему времени путем непосредственных измерений и моделирования появилась возможность отслеживать абсолютное значение числа пятен. На рис. 7.4 приведены данные международной службы Солнца, где каждая точка графика соответствует измеренному или вычисленному числу солнечных пятен.

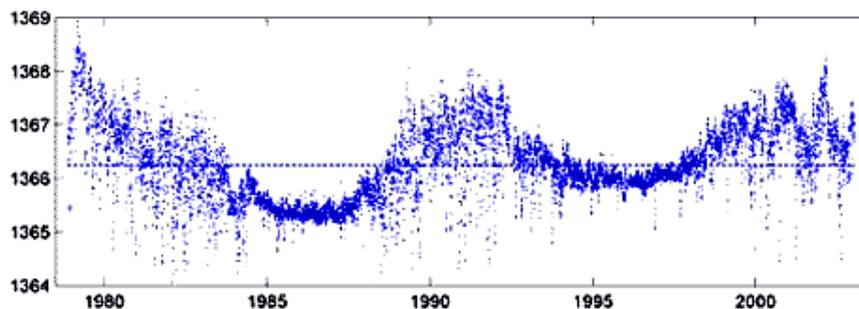


Рис. 7.4. Активность Солнца в последние годы

Постоянство в периодичности числа пятен, судя по данным рис. 7.4, прослеживается и в настоящее время. Нельзя сказать, что зависимость числа пятен от времени описывается идеальной периодической функцией – синусом или косинусом, а вот тенденция периодичности просматривается в явном виде.

В середине прошлого века учеными зафиксировано повышение активности нашей звезды. Солнечная активность стала самой высокой за последние 1150 лет наблюдений. Этот вывод был сделан на основе изучения количества радиоактивных изотопов в ледниковых слоях Гренландии и Антарктики. Исследовалось количество радиоактивного изотопа бериллия-10, который синтезируется высокоэнергетическими элементарными частицами космического происхождения. В периоды повышенной солнечной активности магнитное поле нашей звезды экранирует Землю от космических лучей, и бериллий-10 образуется в меньших количествах.

В конце 50-х гг. прошлого века американский астрофизик Юджин Паркер выдвинул гипотезу о непрерывном расширении выбрасываемого солнечной короной газа в масштабах всей солнечной системы, поскольку газ на значительном удалении от Солнца имел высокую температуру. Эта гипотеза подтвердилась при наблюдениях с помощью советских и американских космических аппаратов. Оказалось, что в межпланетном пространстве были зарегистрированы устойчивые потоки вещества, которые назвали солнечным ветром, являющимся, по сути, расширяющейся солнечной короной. Как было отмечено ранее, солнечный ветер образован в основном ядрами водорода (протонами), ядрами гелия (α -частицами) и свободными электронами.

Частицы, составляющие солнечный ветер, перемещаются в космическом пространстве в радиальном направлении со скоростями порядка нескольких сот метров в секунду. В табл. 7.2 приведены параметры солнечного ветра.

Таблица 7.2

Наименование параметра	Значение
Скорость в околоземном пространстве	450 км/с
Время движения частиц от Солнца до Земли	5,8 суток
Температура, определяемая по тепловой составляющей скорости частиц в периоды спокойного Солнца	10 000 К
Температура, определяемая по тепловой составляющей скорости частиц в активные периоды Солнца	≥ 400 000 К
Общий поток кинетической энергии, уносимой от Солнца в межпланетное пространство частицами солнечного ветра	10^{20} – 10^{22} Дж/с

Компоненты солнечного ветра летят, как видно из табл. 7.2, со скоростями порядка 400–500 м/с, удаляясь от Солнца на расстояние, в сотни раз превышающее абсолютную астрономическую единицу (среднее расстояние между Солнцем и Землей), устремляясь туда, где межпланетная среда Солнечной системы переходит в разреженный межзвездный газ. Вместе с ветром в межпланетное пространство переносятся и солнечные магнитные поля.

В 2002 г. американский спутник и наземные службы зарегистрировали мощную вспышку, сопровождавшуюся возникновением огромного протуберанца, площадь которого в 30 раз превосходила площадь Земли.

В ноябре 2003 г. солнечная мощная вспышка вывела из строя японский спутник связи «Kodama», который перестал функционировать как ретранслятор радиосигналов. Эта же вспышка нарушила авиасообщения в Канаде. Сильнейшие электромагнитные помехи заставили управление полетами разработать специальные маршруты движения самолетов, чтобы не терять с ними радиосвязи.

Воздействие магнитных бурь на земные объекты до конца еще не изучено, но накопленные факты заставляют ученых с опаской относиться к этому природному явлению. Так, в ноябре 2004 г. сильная магнитная буря «прижала» к Земле международную космическую станцию (МКС) – ее орбита снизилась на 7 км. Состыкованный в это время со станцией корабль «Прогресс» попытался поднять станцию, однако двигатели сработали нештатно, и в результате МКС поднялась лишь наполовину.

Конструкторам радиоэлектронной аппаратуры, особенно для летательных аппаратов, приходится снабжать свои устройства специальными защитными системами, экранирующими приемные элементы от электромагнитных наводок. Сложность заключается в том, что помехи, вызванные радиоизлучением Солнца, в своем спектре в изобилии содержат рабочие частоты устройств.

Влияние активности Солнца на живую материю на Земле можно обнаружить, наблюдая состояние растений, микроорганизмов и животных. Изменения магнитного поля Земли, состояние которого находится в прямой зависимости от состояния Солнца, влияет на растения на уровне их клеток.

В периоды повышенной солнечной активности увеличивается проницаемость мембран, что интенсифицирует обменные процессы. Клетки более активно поглощают питательные вещества, стимулирующие их рост и размножение. Кроме того, учеными установлено, что количество аммонифицирующих и нитрифицирующих бактерий в почве тоже растет. Другими словами, в периоды повышенной активности Солнца происходит более интенсивное «удобрение» почвенного покрова, что сказывается на темпах развития растений.



Рис. 7.5. Срез ствола сосны

На рис. 7.5 приведен срез ствола сосны, на котором отчетливо заметно, что толщина годовых колец неодинакова. Наиболее широкие кольца соответствуют периодам повышенной активности Солнца.

Еще до открытия циклической активности Солнца знаменитый английский астроном Ф.В. Гершель (1738–1822 гг.), тот самый, которому посчастливилось 13 марта 1781 г. открыть новую планету Уран, проанализировал динамику цен на пшеницу за прошедшие 200

лет и, сопоставив их с количеством пятен на Солнце, обнаружил ошеломляющую корреляцию.

Цены на зерно падали в периоды повышенной солнечной активности. Рассмотрев далее изменения климата за этот же период времени, Ф. В. Гершель установил, что в интересующие его периоды времени климат становился более влажным. Выпадало больше дождей, отсюда и происходило увеличение урожайности зерновых культур и, как следствие, снижение цен.

После того как эта занятная история о взаимосвязи астрономии и экономики получила огласку в ученом мире, исследователи стали искать обнаруженную взаимосвязь в других аспектах жизни Земли. И результаты, не менее интригующие, чем взаимосвязь цены на пшеницу и количества дождей, не заставили себя долго ждать.

Человек также испытывает зависимость от солнечной активности. Дело в том, что от состояния Солнца, как выяснилось, зависит жизнедеятельность микрофлоры, которая, в свою очередь, определяет предрасположенность человеческого организма к различного рода заболеваниям. Например, установлено, что эпидемии холеры в прошлые времена буйствовали именно во время повышенной солнечной активности. Период наиболее опасных и массовых эпидемий гриппа имеет продолжительность 11,3 года, причем эпидемии начинаются за 2,3 года до начала максимума солнечной активности и идут на спад за 2,3 года до окончания этого периода.

Большой вклад в изучение влияния Солнца на возникновение эпидемических заболеваний внес отечественный исследователь А.Л. Чижевский, проанализировавший за длительный промежуток времени динамику таких эпидемических заболеваний, как чума, холера, тиф. На конкретном статистическом материале А.Л. Чижевским было показано, что наиболее сильные смертоносные эпидемии возникали на планете именно в периоды наибольшей солнечной активности. Такая же закономерность была обнаружена для заболеваний дифтерией, менингитом, полиомиелитом, дизентерией и скарлатиной.

В 60-х гг. XX в. врачи начали наблюдать влияние состояния Солнца на сердечно-сосудистые заболевания людей. Несложно было заметить, что первыми начинают «чувствовать» разгулы стихии на Солнце люди, перенесшие инфаркт миокарда, причем реакция наблюдалась не на абсолютные показатели излучения, а на скорость их изменения. Резкие хромосферные всплески уровня активности, существенно влияющие на состояние магнитного поля Земли, переносились ими наиболее тяжело. В магнитосфере Земли в это время происходили так называемые магнитные бури.

Во Франции накануне Второй мировой войны в курортном городе Ницце врачи обнаружили, что в периоды экстренных вызовов карет скорой помощи из-за сердечных приступов всегда нарушалась телефонная связь, временами даже пропадая совсем. Этот феномен позже объяснили физики. Нарушения работы сердца появились у людей во время магнитных бурь, которые возникали как следствие процессов в солнечной хромосфере.

По большому счету, врачи уже давно стали приписывать естественным магнитам лечебные свойства. Аристотель, Плиний Старший, Парацельс и придворный врач Вильям Гилберт, открывший магнитное поле Земли, с переменным успехом использовали магниты в своей практике.

По результатам современных исследований установлено, что магнитное поле наиболее значимо влияет на регуляторные системы организма (нервную, эндокринную и кровеносную). Действие магнитного поля тормозит условные и безусловные рефлексы и влияет на состав крови. Подобная реакция организма человека на магнитное поле объясняется прежде всего изменением свойств водных растворов в организме человека.

В 1934 г. английские исследователи Джон Бернал и Ральф Фаулер высказали гипотезу о наличии у воды при определенных обстоятельствах свойств, присущих кристаллическим структурам. В настоящее время открытый широкий класс жидких кристаллов используется для визуализации в мониторах, дисплеях и подобных устройствах.

В условиях, близких к нормальным, кристаллическая структура воды неустойчива и проявляется не вполне очевидно. При воздействии на воду магнитным полем она приобретает целый ряд не совсем обычных для воды свойств. Подвергнутая магнитной обработке вода проявляет весьма низкую способность к образованию накипи

на нагревательных поверхностях, изменяет свои диэлектрические и оптические свойства. Политые обработанной водой семена дают более дружные всходы. Стройной теории взаимодействия воды и магнитного поля к настоящему времени не создано, имеются рабочие гипотезы, которые требуют тщательной экспериментальной проверки на систематической основе.

Применительно к живым организмам, которые более чем на 70% состоят из воды, являющейся неотъемлемой составной частью клеток и тканей, удастся только фиксировать стабильное негативное влияние на самочувствие всяких изменений магнитного поля Солнца, особенно в периоды солнечных бурь. Именно в периоды активизации Солнца на нашей планете происходят события, подобные Варфоломеевской ночи.

На основании скрупулезного анализа архивных материалов учеными установлено, что абсолютное количество практически всех видов животных на нашей планете является функцией времени. Это происходит в силу целого ряда причин, среди которых солнечная активность занимает не последнее место.

Известно, что задолго до возникновения мировых религий монгольские и тюркские народы имели специальный календарь – «мушель», содержащий рекомендации животноводам. В частности, там отмечались неблагоприятные годы для роста поголовья животных. Особое место занимали годы Зайца, которые наступали, как известно, через каждые 12 лет. Годы пресловутого Зайца совпадали с периодами, как сейчас говорят, спокойного Солнца.

При более тщательном рассмотрении этого совпадения было обнаружено, что и в наше время численность заячьего «населения» тоже заметно изменяется в зависимости от активности Солнца. Наибольшая численность зайцев-беляков наблюдается в периоды максимальной солнечной активности. На рис. 7.6 приведены две зависимости от времени: сплошная кривая характеризует процесс заготовок зайцев в Якутии (М·%), нормированных в процентах относительно минимальной величины, а пунктирная кривая – солнечную активность, сдвинутую по временной оси на 5 лет.

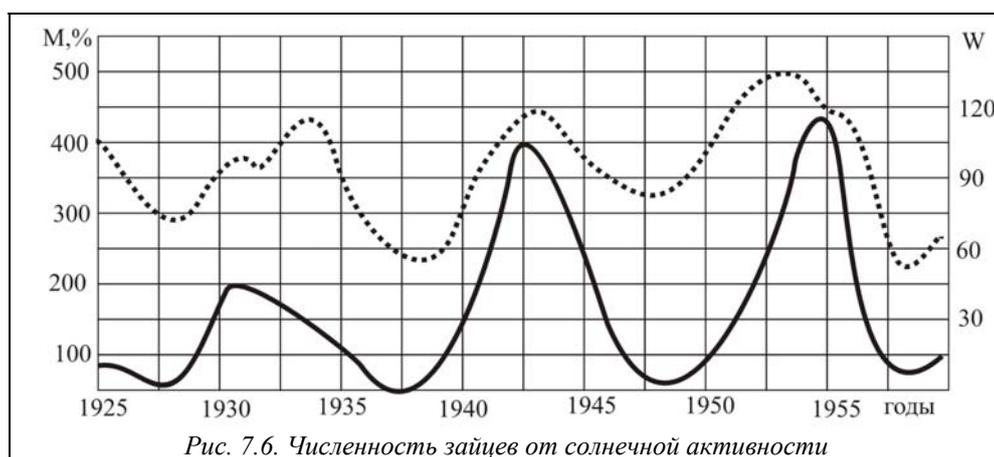


Рис. 7.6. Численность зайцев от солнечной активности

Таким образом, данные за период с 1925 по 1959 гг. показали, что численность зайца-беляка в Якутии в зависимости от солнечной активности меняется практически так же, периодически. В этой связи не вызывает сомнения, что эти изменения численности животных вызваны именно солнечной активностью – фактором, который действует одинаково на разных долготах, на всей Земле, то есть в планетарном масштабе.

Непосредственное влияние космических факторов на состояние животных подтверждается тем, что для отдельных видов сроки увеличения их численности часто совпадают. В Северной Америке, например, в течение длительного периода времени, охватывающего не одно столетие, годы большой добычи зайцев, рябчиков и рысей тоже синхронизированы с солнечной активностью. Наиболее рельефно особенности солнечного влияния проявляются при смене столетий. Так, например, около 1900 г. возрастание численности животных приходилось не на периоды минимумов солнечной активности, а на время повышенных солнечных проявлений.

При более детальном рассмотрении оказалось, что численность животных зависит от активности Солнца, проявляясь двояко. В одном случае периодичности совпадали таким образом, что максимумы численности приходились на минимумы солнечной активности, а в другом – максимумы численности некоторых видов животных – на максимумы активности Солнца, но в обоих случаях имела место корреляция.

Вопрос о влиянии солнечной активности на численность животных и урожайность сельскохозяйственных культур достаточно изучен, а вот о влиянии активности Солнца на организм человека ученые мало что знают. Человек, являясь, по мнению некоторых ученых, вершиной эволюционного процесса живой материи, не столь прост в своем состоянии и взаимодействии с природой, как животные и растения. Всем известно: чем сложнее система (механическая, термодинамическая, социальная и т. п.), тем многочисленнее и сильнее ее внутренние связи, что некоторым образом нивелирует действие внешних объектов. Сложные системы быстрее и эффективнее адаптируются к изменению внешних условий.

В такой сложной системе, как человеческое общество, было бы легкомысленным сводить все мотивации, движущие индивидами, к динамике образования и исчезновения солнечных пятен. Естественно, что воздействие Солнца на организм человека, как говорится, имеет место быть, однако уровень человеческого познания таков, что сейчас можно говорить только о неких частных проявлениях в отдельных геополитических ситуациях, а это всегда оставляет место для сомнений: не простые ли это совпадения?

Следует иметь в виду, что атмосфера и магнитосфера Земли являются достаточно надежным экраном от внешних воздействий, включая и солнечное излучение как в форме полей, так и в форме частиц. На рис. 7.7 показана картина взаимодействия солнечного излучения с магнитным полем Земли.

Несмотря на защитные свойства магнитосферы Земли, влияние Солнца на биологические и технические процессы велико. Прежде всего это касается метеочувствительных людей, особенно склонных к сердечно-сосудистым заболеваниям. Это влияние сказывается на функционировании телекоммуникационных систем, связанных с использованием космических аппаратов в качестве ретрансляторов сигналов.

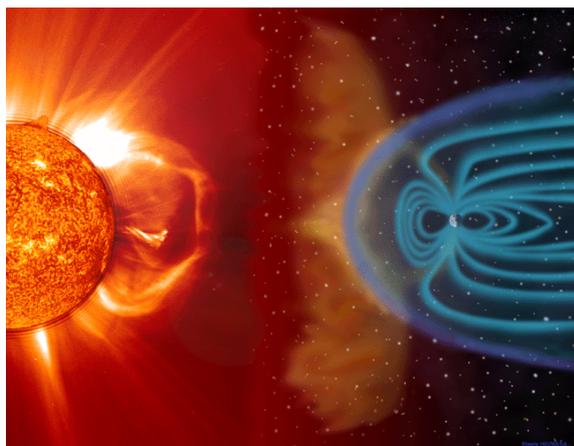


Рис. 7.7. Взаимодействие Солнца и Земли

7.2. Земля

Для совместного рассмотрения насущных вопросов естественнонаучного комплекса дисциплин, целесообразно привести некоторые дополнительные сведения, касающиеся физических, химических, биологических и геологических свойств как нашей планеты, так и окружающего ее космического пространства. Представляют интерес и исторические сведения, сохранившиеся в дошедших до нашего времени документах.

На самых ранних, известных ученым этапах своего развития люди проявляли постоянный интерес к небу. Поместив большую часть своих богов именно на небе и, связывая с их волей свои судьбы, человечество было вынуждено доступными методами и средствами следить за состоянием небесных сфер. Естественно, что представление об окружающем Землю пространстве соответствовало уровню знаний и возможностям имеющихся в распоряжении наблюдателей инструментов.

Первоначальная информация была, по теперешним представлениям, в немалой степени наивной. Так, например, в мифах Древней Греции понятие небесного свода ассоциировалось с некой крышей, простиравшейся над земной твердью. Достаточно вспомнить, что Геракл, незаконнорожденный сын главного из богов, совершая один из своих двенадцати подвигов, удосужился некоторое время держать на своих могучих плечах небесный свод. Пока Атлас путешествовал по просьбе Геракла за золотыми яблоками Гесперид (запад нынешней Испании), гигант исполнял эту нелегкую работу. Вот как сказал об атлантах, держащих небосвод, Юрий Визбор:

*Держать его махину – не мед со стороны.
Напряжены их спины, колени сведены.
А небо год от года все давит тяжелей,
Дрожит оно от гула ракетных кораблей.*

Да, Геракл был гигантом, но не до такой же степени. По другим свидетельствам мифологии, Геракл был высок, но не настолько, чтобы превосходить размерами, например, горы. Таким образом, естественно предположить, что в представлении древних греков небо начиналось практически сразу (несколько метров не в счет), за выступающими точками гористой местности.

В Библии все, что располагается над землей, называется небесным сводом. Это понятие происходит от латинского слова «firmament», основу которого составляет слово «firmus» – твердый.

Наблюдая за перемещением светил по небесному своду, древнегреческие астрономы уже в IV в. до с. л. поняли, что небо нельзя представить одним простым навесом. В ночном небе они видели как неподвижные относительно друг друга светящиеся объекты (далекие звезды), так и активно движущиеся, изменяющие свое положение в течение одной ночи. Солнце, Луна, Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн (другие планеты в те далекие времена еще не были открыты) перемещались по своей собственной траектории. Древние греки назвали их планетами. Слово планета в переводе с греческого языка означало «блуждающий».

Созерцательный период астрономии закончился в 240 г. до с. л. Эратосфен Киренский, возглавлявший знаменитый Муссейон, который находился в Александрии.

Эратосфен обратил внимание на то, что 21 июня, в полдень, в египетском городе Сиена (нынешний Асуан) солнце находилось строго в зените. В то же самое время в Александрии, расположенной на расстоянии 805 км севернее, все вертикально стоящие предметы отбрасывали тень.

Вывод ученого был поистине гениальным для того давнего времени. Причиной такого явления могла быть только кривизна поверхности Земли. Используя простейшие геометрические модели, Эратосфен вычислил кривизну земного шара (рис. 7.8).

В результате расчетов получилась величина, весьма близкая к точному значению, $R_3 \cong 6400$ км. Поражает прозорливость ученого и его умение владеть минимумом информации для получения совершенно фантастических для своего времени результатов.

В 100 г. до н. э. Эратосфена проверил Позидон из Апамеи. Повторив измерения, он получил менее точный результат – $R_3 \cong 4600$ км (рис. 2.4). Эта величина по странному стечению обстоятельств была принята как более правдоподобная. Заниженное значение размеров Земли использовали многие астрономы древности, включая знаменитого Клавдия Птолемея, одного из последних бескорыстных защитников теории Аристотеля о неподвижности Земли как центра Вселенной. Значение радиуса Земли, вычисленное Птолемеем, было поставлено под сомнение только в 1521–1522 гг. после завершения экспедиции Магеллана.

Геометрические методы определения космических расстояний были использованы Аристархом Самосским, который вычислил расстояние от Земли до Луны, используя в качестве единицы измерения диаметр нашей планеты. Наблюдая затмения Луны, Аристарх догадался, что причиной затмения была Земля, находящаяся между Солнцем и Луной. Граница тени Земли, пересекающей Луну, позволила установить их относительные размеры. Полученное в результате вычислений расстояние $L_{З/Л} \cong 3,84 \cdot 10^5$ км оказалось весьма близким к точному значению, экспериментально измеренному с помощью современных лазерных технологий.

Распространяя геометрический метод на более дальние расстояния, Аристарх пришел к выводу, что Солнце должно быть расположено от Земли на расстоянии $L_{СЗ} \cong 20 L_{ЗЛ}$. Несмотря на то что полученная величина была занижена примерно в 20 раз, древний астроном понял, насколько собственные размеры светила превосходят земные. И сразу вставал резонный вопрос: почему огромное по размерам и массе Солнце вращается вокруг маленькой Земли? Нелогично. Высказав идею о том, что Солнце не может быть спутником Земли, Аристарх Самосский не был услышан современниками, находящимися в плену идей великого Аристотеля. Сокрушать авторитеты было трудно, похоже, что вера придавала людям силы во все времена. Как известно, геоцентрическая система устройства мира господствовала в научной среде до 1545 г. н. э. – до выхода в свет книги Николоса Коперника, который, по сути, вернулся к истокам – на более чем десять веков назад, в эпоху гениального и дерзкого Аристарха Самосского.

Все существовавшие на Земле религии, от самых ранних, «неправильных» – языческих и до современных, «правильных», имели непрменный и основополагающий атрибут – свою теорию сотворения мира. Естественно, что основное внимание в мифах уделялось именно Земле, а все остальное, что ее окружало, имело назва-

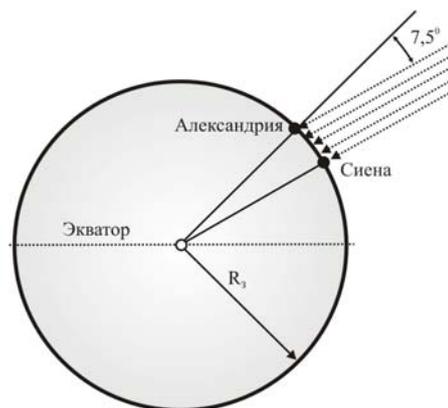


Рис. 7.8. Наблюдения Эратосфена

ние «небо», или «небеса»). Сотворение мира древние люди относили не к столь далеким временам, как теперь. Промежутки времени в тысячу лет воспринимались более реальными, чем в миллионы. Показательным примером, на наш взгляд, представляется попытка определения даты рождения Земли на основе исследования генеалогических хитросплетений персонажей первых глав Книги Бытия.

Все существовавшие на Земле религии, от самых ранних, «неправильных» – языческих и до современных, «правильных», имели неперемный и основополагающий атрибут – свою теорию сотворения мира. Естественно, что основное внимание в мифах уделялось именно Земле, а все остальное, что ее окружало, имело название «небо», или «небеса»). Сотворение мира древние люди относили не к столь далеким временам, как теперь. Промежутки времени в тысячу лет воспринимались более реальными, чем в миллионы. Показательным примером, на наш взгляд, представляется попытка определения даты рождения Земли на основе исследования генеалогических хитросплетений персонажей первых глав Книги Бытия.

В 1658 г. архиепископ Джеймс Ашер, проанализировав, кто кем был рожден и на ком женился (вышел замуж), пришел к выводу, что избранная Богом планета была произведена на свет, опять-таки божий, 22 октября 4004 г. до н. э., в 8 часов пополудни. Средневековые греческие теологи, сопоставив известные исторические свидетельства о цивилизациях Месопотамии и Египта, посчитали уместным сдвинуть эту знаменательную дату в глубь веков на 5508 г. до н. э.

Библейский вариант сотворения мира господствовал в официальной науке до 1785 г. н. э., до выхода в свет сочинения шотландского естествоиспытателя Джеймса Хаттона «Теория Земли». Хаттон утверждал, что, судя по скорости протекания процессов на поверхности Земли в виде образования и выветривания гор, изменениям положения речных течений и т. п., возраст нашей планеты должен быть существенно большим, нежели по библейским теориям. Сделав предположение о постоянстве скорости процессов, исследователь сформулировал так называемый принцип единообразия. То, что видел на поверхности Земли Хаттон, по его убеждению, должно было начаться не тысячи лет назад – как минимум счет должен идти на миллионы. Как и следовало ожидать, смелые и научно обоснованные предложения Хаттона не встретили официальной поддержки.

Однако естественнонаучные факты имели свойство напоминать о себе по совершенно различным поводам. В 30-х гг. XIX в. н. э. подданный ее величества Чарльз Лаелл публикует трехтомное сочинение «Принципы геологии», в котором с британской добросовестностью и бесстрашием подтверждает на 100% правоту Хаттона. Современная геология начала свое существование с Лаелла, одновременно несколько прояснив ситуацию с возрастом нашей планеты.

Возраст Земли пытались вычислить, используя принцип единообразия, по толщине осадочных пород, оседающих вследствие действия воды. Несмотря на большие ошибки из-за влияния выветривания, выкрашивания, сдвигов и других причин, влияющих на результат, стало очевидным, что нашей планете никак не менее 500 миллионов лет.

Еще более почтенный возраст Земли был определен в 1715 г. английским астрономом Эдмундом Хейли по концентрации солей в Мировом океане. Хейли предположил, что изначально океан был пресным, а его наполнение солями происходило за счет речных стоков. Чтобы создать соленость около 3%, требовалось время – не менее миллиарда лет. Такой же порядок возраста давали исследования биологов, проследивших развитие примитивных одноклеточных существ.

Однако новую неясность в вопрос о возрасте нашей общей обители, как это и следовало ожидать, внесли физики. В середине XIX века адепт немецкой класси-

ческой физики Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц дерзнул применить закон сохранения энергии к Солнцу. По мнению Гельмгольца, Земля не могла быть старше Солнца, а Солнце, по тогдашним представлениям о термодинамике, не могло очень долго излучать столько энергии без ущерба для своего состояния. Яркий представитель английской физической школы Уильям Томсон, ставший за свои научные заслуги лордом Кельвином, в результате термодинамических вычислений определил, что возраст Земли не должен превышать 50 миллионов лет.

К концу XIX века мнения ученых о возрасте Земли разделились. По одну сторону условной баррикады находились физики, доказывая, что по всем любимым ими законам наша планета не могла в твердом состоянии находиться более миллиарда лет. Нападающая же сторона, представляющая геологов и биологов, пыталась предьявить неопровержимые, по ее мнению, доказательства таковой возможности.

Однако никто не мог предположить, что в 1896 г. Анри Беккерель откроет явление радиоактивности с его фантастической энергетикой, что повергнет в прах все классические термодинамические теории. Молодая физическая поросль, не отягощенная чрезмерным преклонением перед авторитетами и своими учителями, крушила классические устои физических основ мироздания. Юный Эрнст Резерфорд, любимый ученик знаменитого Джона Джозефа Томсона, открывшего электрон и предложившего миру первую модель атома, на одной из своих лекций в присутствии лорда Кельвина несколькими фразами перечеркнул многолетние труды мэтра. Он заявил, что не имеет смысла скрупулезно подсчитывать, за какое время могла остыть Земля до теперешнего состояния, без учета ее постоянного подогрева изнутри за счет освобождения энергии радиоактивными веществами.

Проникновение в глубь материи на атомный и ядерный уровень сделало вполне реальным исчислять возраст Земли миллиардами лет. Изучение остаточной радиоактивности горных пород позволило отнести их возраст к отметке в 4 млрд. лет. Современные исследования, проведенные с использованием более совершенных приборов, определили возраст Земли в твердотельном состоянии – 4,7 млрд. лет.

Представления о внутреннем строении Земли начали формироваться в древние времена, когда люди на себе испытывали проявления земной активности в виде землетрясений и извержения вулканов.

В течение последних пяти веков, по имеющимся у ученых данным, при землетрясениях погибло около 6 млн. человек, причем практически половина из них проживала в Китае.

В 1556 г. в провинции Шэнси в результате подземных толчков погибло 830 тыс. человек. Спустя 420 лет, в 1976 г., в районе Тендзян жертвами колебаний поверхности земли стали, по разным оценкам, от 350 тыс. до 1 млн. жителей. Подобные катастрофы случались и в других странах: в 1908 г. в итальянском городе Мессина погибли 120 тыс. жителей; 1755 г., Лиссабон – погибло 50 из 220 тыс. человек, проживающих в этом городе; 1737 г., Калькутта – погибло 300 тыс. человек; 1923 г., Токио – 143 тыс. человек. В табл. 2.1 приведены сведения о жертвах, случившихся вследствие природных катаклизмов на Земле в период с 1947 по 1997 гг.

Как видно из приведенных данных, только циклоны, тайфуны и штормы представляют для человечества большую угрозу, чем землетрясения. Необходимо отметить, что цунами в большинстве своем тоже являются следствиями подводных землетрясений.

Величина энергии, выделяющейся в результате сильного землетрясения, уступает, по сути, только энергии, производимой космическими объектами. Правда, и

человек способен уже вызвать рукотворные катаклизмы в виде термоядерных взрывов, энергия которых всего в 100 раз меньше энергии сильного землетрясения.

Не заметить такой активности планеты было просто невозможно. Проблема землетрясений стала для человечества актуальной по двум основным причинам. Во-первых, землетрясения – это зло, уносящее так запросто тысячи жизней. Во-вторых, ученые уже давно поняли, что изучение явлений, связанных с относительными перемещениями поверхностных слоев Земли, может помочь составить хотя бы схему ее внутреннего строения.

В настоящее время для определения силы землетрясений используются две шкалы: одна – 12-балльная, так называемая описательная шкала MSK-64 (Медведева – Шпонхойера – Карника), которая принята на территории нашей страны, и другая – логарифмическая, или магнетудная, 9-балльная шкала Рихтера, которая характеризует энергию землетрясения в месте его возникновения – в гипоцентре. Изменение силы землетрясения по этой шкале в один балл соответствует 100-кратному изменению выделяющейся энергии. Проекция гипоцентра на земную поверхность называется эпицентром. Сила землетрясения, таким образом, зависит от расстояния между гипоцентром и эпицентром, т. е. от глубины расположения гипоцентра.

Теория колебаний и волн позволила прийти к еще одному очень важному заключению. В 60-х годах прошлого века были обнаружены незначительные колебания положения полюсов земного шара, происходящие после сильных землетрясений, в частности чилийского в 1960 г. и аляскинского в 1964 г. Было установлено, что колебания имеют период 430 суток. Если бы Земля была твердым телом, то период не должен был превышать 305 суток. Это обстоятельство явилось очередным подтверждением, что ученые имели дело с колебаниями шара с жидкой сердцевиной.

Исследования последних 30 лет позволили, таким образом, установить, что Земля расслоена концентрическими оболочками (рис. 7.9).

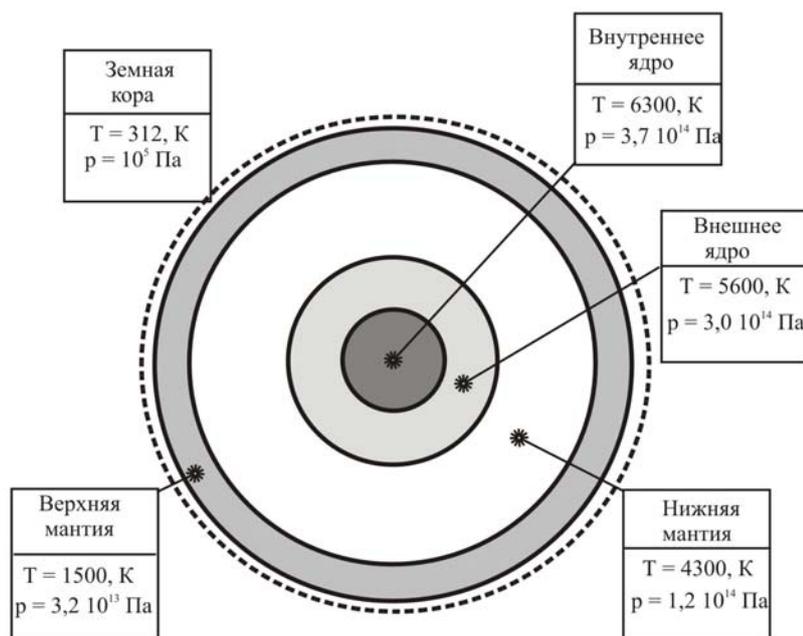


Рис. 7.9. Схема внутреннего строения Земли

Предполагается, что центральная часть планеты – внутреннее ядро состоит из металлического вещества в твердом состоянии. Плотность внутреннего ядра $\rho_{\text{внутр.ядро}}$ составляет примерно $13 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Далее располагается жидкое внешнее ядро с плотностью $\rho_{\text{внеш. ядро}} \cong 9 - 11 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Внешнее ядро окружено нижней мантией с плотностью $\rho_{\text{нижн. манти.}} \cong 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Верхняя мантия имеет плотность $\rho_{\text{верх. манти.}} \cong 3,56 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Поверхностный слой Земли называется корой, его средняя плотность составляет $\rho_{\text{кор.}} \cong 2,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Проведенные в последнее время исследования продолжительности земных суток, выполненные с помощью квантовых стандартов частоты, показали, что их продолжительность уменьшается на 1 микросекунду за 10 лет.

По гипотезе ученых, это происходит вследствие того, что жидкий слой планеты за счет сил вязкого трения гасит некоторую часть энергии вращательного движения. Всем известен способ, как отличить вареное яйцо от сырого.

Достаточно придать яйцам вращательное движение. Вареное яйцо будет вращаться достаточно долго, потому что является, по сути, твердым телом. Сырое яйцо, сделав несколько оборотов, остановится. После начала вращения более вязкий желток некоторое время будет оставаться в покое относительно скорлупы и слоя белка. Часть первоначальной энергии вращения будет рассеиваться в виде тепловых потерь при движении вязкого белка.

Землю не представляется возможным рассматривать как полностью сформировавшееся, незволюционирующее космическое тело. В течение 5 млрд. лет ее существования изменениям подверглось как внутреннее строение, так и поверхность с атмосферой.

На основании данных вулканологов и геофизиков, на поверхность планеты из ее недр ежегодно выбрасывается $\Delta m \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ кг}$ вещества. По сравнению с общей массой Земли $M_3 \cong 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ масса ежегодных выбросов невелика, но если процесс перемещения массы рассмотреть во времени, то за период существования нашего общего дома было перемещено $\Delta M \cong 5 \cdot 10^{20} \text{ кг}$. Выброс такого количества вещества со средней плотностью $\rho \cong 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ обеспечил при равномерном распределении по поверхности слой толщиной $\cong 34 \text{ км}$.

Последнее обстоятельство указывает на то, что земная кора является продуктом долговременной эволюционной переработки вещества верхней мантии.

Строительство планеты, таким образом, продолжается, причем человечество, будучи совершенно беспечным, получая регулярно довольно жестокие предупреждения матери-земли, продолжает относиться к ней, так же как и к себе, крайне легкомысленно.

При землетрясениях люди гибнут сотнями, а иногда и тысячами, при этом государства и граждане несут ощутимые экономические потери. Были такие периоды в истории естествознания, когда казалось, что осталось совсем мало времени до того дня, когда ученые научатся с высокой степенью достоверности предсказывать землетрясения: научились же предсказывать солнечные затмения и другие события планетарного и космического масштаба.

Однако, несмотря на то что уже многое стало известно о строении Земли и выяснились некоторые закономерности проявления «характера» нашей планеты, до точных краткосрочных (за несколько часов или суток) и среднесрочных (в течение года) прогнозов пока еще далеко. Иное дело – долгосрочные прогнозы. Известно, например, что на Камчатке с высокой степенью вероятности может произойти сильное или катастрофическое землетрясение. Причем сроки: пять минут, пять суток, пять лет, двадцать лет, сто лет – практически равновероятны.

Поскольку остановить эволюцию планеты человеку не дано, то он должен приспособливаться к ее процессам, по крайней мере, к тем, что им уже осознаны. Если люди, осознавая опасность, стали селиться и развивать мегаполисы в активных районах Земли, то они должны быть готовы к неприятностям, связанным с естественной «жизнью» планеты. Надо уважать природу и относиться к ней со всей серьезностью.

Если проанализировать крупные трагедии, произошедшие вследствие землетрясений последнего времени, то в большинстве своем они вызваны недопустимо низким уровнем сейсмичности зданий и сооружений, а также вопиющими отступлениями от технологии возведения сооружений в сейсмоопасных районах. Несмотря на некоторую кощунственность мысли, получается так, что человечество платит слишком дорогую цену за собственную беспечность и переоценку своей роли в жизни Земли.

Эволюция планеты Земля. К настоящему времени широкомасштабное понятие эволюции принято условно разделять на три составляющие: неорганическую, органическую и социальную. Эволюция (развитие) неорганического земного мира протекает относительно медленно, она не так очевидна с позиций наблюдателя с ограниченными временными возможностями. В этой связи сам факт неорганической эволюции не так очевиден.

Вместе с тем своим существованием он подтверждает, что под эволюцией необходимо понимать процессы, связанные с самоорганизацией материи. Органическая эволюция человеку также недоступна для наблюдения, потому что он находится внутри процесса. Так, бактерия, живущая в желудке щенка, ввиду несоизмеримости времен существования не может фиксировать глобальные изменения в состоянии организма собаки при его развитии, если бы даже она могла ставить такую цель.

Человек только в последние десятилетия начал подступаться к загадкам мутаций органики на поверхности нашей планеты. Что, кстати, послужило неоправданно долгому преобладанию монополизма теории естественного отбора. Социальная эволюция, которая не менее важна и интересна, обладает относительно высокой скоростью процесса и может наблюдаться даже на протяжении времени, отпущенного одному поколению людей. Достаточно вспомнить, что еще остались среди живущих люди, родившиеся до Великой Октябрьской социалистической революции 1917 г., или, как сейчас модно говорить, до октябрьского переворота.

Вопросами эволюции заинтересовались в XVII веке стараниями Рене Декарта и Исаака Ньютона. Эволюционные теории заняли доминирующее положение в науке после трудов Ч. Лаэлля и Ч. Дарвина. Работы этих ученых позволили установить, что эволюцию можно рассматривать как неизбежный процесс усложнения наблюдаемого мира.

Следует отметить, что развитие любого земного организма, с точки зрения человека, не может восприниматься как эволюция: все, что будет наблюдаемо на протяжении жизни, – старение. Если наблюдать за секвойей, которая в среднем живет около 3 000 лет, то можно изучить только процесс старения. Другими словами, при рассмотрении эволюционных процессов следует иметь в виду, **что бессмертен только феномен жизни в постоянно эволюционирующей Вселенной.** Биосфера Земли тоже смертна, но, тем не менее, она подвержена эволюции вот уже более 4 млрд. лет. В этой связи развитие земной биосферы относительно человека является эволюцией. Все дело в сопоставлении отведенных времен.

В современном представлении понятие эволюции используется, как правило, в двух смыслах. Во-первых, понятие эволюции применяют в тех случаях, когда хотят подчеркнуть постепенный характер того или иного процесса. Во-вторых, понятие эволюции применяется как противовес революционных изменений, имеющих скачкообразный характер. Следует обратить внимание, что эволюционные и революционные характеры процессов имеют одинаковое направление, только протекают во времени с существенно различающимися скоростями. Логично предположить, что революционный характер процессов тоже вписывается в общую схему эволюции, происходящей по более динамичным законам.

История нашей планеты подтверждает следующие тенденции эволюционной теории: последовательное и закономерное развитие под действием внутренних сил, что соответствует теории самоорганизации материи. **Направление эволюции, обусловлено интенсификацией метаболизмов, т. е. циркуляцией вещества и энергии в природе.** Все изменения протекают при участии в эволюционном процессе биосферы и ноосферы.

Как уже отмечалось ранее, наиболее рабочей версией образования Солнечной системы является так называемая аккреационная теория, т. е. предположение о возможности формирования объектов из газопылевых туманностей, в изобилии присутствующих и в нашей галактике. Вследствие флуктуационных процессов сжатие таких туманностей под действием сил гравитации сопровождается их дроблением на отдельные фрагменты, которые по массе и размерам могут превосходить нашу Солнечную систему. Астрономы такие облака называют протозвездами.

Гравитационное стягивание пылегазовых образований сопровождается рядом физических явлений.

Во-первых, они уменьшаются в размерах, становясь более плотными.

Во-вторых, от спонтанного гравитационного взаимодействия с окружающими звездами облака получают незначительную вращательную составляющую.

В-третьих, угловая скорость вращения туманностей ввиду справедливости закона сохранения момента импульса с изменением размеров увеличивается. При этом форма пылевого облака из сферической трансформируется в дискообразную. Астрономы полагают, что на этой стадии эволюции материи могут иметь место две геометрические формы. Если облако принимает форму диска, то при его дальнейшем преобразовании образуется двойная звезда. Если в центре облака имеется сферическое утолщение, то при его распаде возникает солнечная система, подобная нашей.

Вращающиеся газ и пыль ведут себя по-разному. Как правило, пыль собирается в окрестностях оси вращения в виде плоского экваториально ориентированного блина, а газовая составляющая туманности концентрируется в виде сферической формы облака с увеличивающейся плотностью по направлению к оси вращения. Пыль экваториального диска, будучи разорванной на фрагменты, слипается в планеты, а центральное газовое облако, сжимаемое гравитацией, превращается в звезду, подобную нашему Солнцу.

Относительно нашей планетной системы сложилось мнение, что она возникла около 5 млрд. лет назад из газопылевого облака, состоявшего на 98–99% из водорода с примесью гелия. Силы гравитационного сжатия «запустили» ядерный реактор Солнца. Возникший при этом солнечный ветер сдул с ближайших молодых планет системы их водородные атмосферы. Меркурий и Венера напрочь лишились своих атмосфер. На третьей планете Солнечной системы (Земле) ввиду затухания солнечного ветра сохранилось примерно 0,5% водородной атмосферы от ее первоначальной

массы, на четвертой от Солнца планете (Марсе) осталось уже 3–5% первоначальной атмосферы. На мифической пятой планете Фаэтон осталось 30% водородной оболочки, а на гигантах Юпитере и Сатурне, т. е. на шестой и седьмой планетах, водородная оболочка осталась в первозданном виде.

Кстати, о Фаэтоне. Ряд астрономов считает, что между Марсом и Юпитером существовала еще одна планета, которая вследствие резкого падения атмосферного давления при срыве водородной оболочки взорвалась, образовав поле астероидов.

Земля за 4 600 млрд. лет прошла долгий путь эволюции – от однообразного пылегазового образования в виде туманности до теперешней сложной структуры, о которой говорилось выше. Доминирующей причиной формирования сложных структур на первоначальном этапе являлась гравитация, породившая не только слоистую структуру планеты, но и ставшая основным источником энергии, обеспечившим наблюдаемое ныне температурное распределение.

Современные теории эволюции Земли рассматривают два внутренних источника энергии – гравитационный и термоядерный. Эти теории во многом расходятся в вопросах определения приоритета гравитации и реакций термоядерного синтеза. Согласно одной из точек зрения Земля вначале была сравнительно холодной, только после гравитационного разогрева часть вещества расплавилась, а температура сделалась возможной для протекания радиоактивных процессов. Согласно второй точке зрения основной причиной является гравитация. Аккреция была настолько стремительной, что планета разогрелась в период начального формирования за счет высвобождающейся потенциальной энергии. Источником потенциальной энергии в расплавленной Земле был процесс опускания тяжелых соединений железа к центру планеты.

В настоящее время устоялось мнение об одновременном существовании двух вышеупомянутых энергетических источников. Споры в основном разворачиваются вокруг вопроса о доминировании одного или другого процесса. Если принять превалирование гравитационного механизма, то к настоящему времени вне внутреннего ядра Земли осталось около 15% всего наличного железа, которое может опускаться к ядру еще около 1,5 млрд. лет, после чего наша планета превратится в геологически неактивное космическое тело, подобное Луне.

Гравитационная дифференциация органически вписывается в общую концепцию эволюции, так как способствует усложнению структуры. В соответствии с современными физическими представлениями вещество Земли при столь значительных давлениях должно представлять собой достаточно твердое тело, но экспериментальные данные, о которых упоминалось ранее, говорят, что это твердое состояние демонстрирует свойства очень вязкой жидкости. Даже форма планеты – эллипсоид с несколько выпяченным Северным и вдавленным Южным полюсами – идеально соответствует форме, которую должна принимать вязкая жидкость в равновесном состоянии. В толще этой псевдожидкости постоянно протекают чрезвычайно медленные, но фантастически мощные движения масс вещества, обеспечивающие горообразование, вулканизм и землетрясения. Рассмотренные в предыдущем подразделе геосферы Земли можно условно разделить на три основных слоя: тяжелый, промежуточный и легкий. Внутренний тяжелый слой с плотностью более $8 \cdot 10^3$ кг/м³ состоит из соединений железа и других металлов (MgO, SiO₂, Fe, FeO, Ni, CaO и др.). Радиус этой области составляет около 2 900 км.

Толщина легкого слоя – земной коры плотностью около $2,5 \cdot 10^3$ кг/м³ составляет всего 33 км. Земная кора, так же как и на других планетах Солнечной системы, возникла в результате жидкостного расслоения вещества на более плотные

железосиликатные, железокремнистые и так называемые флюидные оболочки. Вопрос о времени возникновения земной коры продолжает возбуждать в научном мире не утихающие уже долгие годы споры. Тем не менее можно считать устоявшимся мнением о том, что 4 млрд. лет назад за счет интенсивного вулканизма уже существовала начальная форма коры толщиной около 10 км. Примерно 1 900–1 700 млн. лет назад произошла перестройка земной коры: возникли системы разломов, между которыми формировались прогибы, послужившие возмущению дрейфу материков.

Сначала ученые придерживались гипотезы о фиксизме, т. е. полагали, что перемещения масс внутри Земли происходят только под действием вертикальных сил, в радиальном направлении. Затем возобладала теория тектонических плит, согласно которой около 3 млрд. лет назад возникли гигантские силикатные плиты, составляющие часть коры и «плавающие» в жидкой мантии.

При всей интригующей непосредственности и распространенности теории тектонических плит у нее есть очевидные изъяны. Теория не может объяснить или опровергнуть факт схожести контуров некоторых материков, например Африки и Южной Америки.

В эволюционном процессе Земли активным образом участвуют обстоятельства космического происхождения. С позиций теоретической механики и термодинамики Земля является открытой системой. Она как получает электромагнитное излучение в широком спектре от Солнца, так и излучает электромагнитные волны в длинноволновом тепловом диапазоне в космическое пространство. Кроме того, Земля является объектом гравитационного взаимодействия со множеством космических объектов, прежде всего – с Солнцем и Луной. Из механики известно, что даже три тела могут образовать систему с динамическим хаосом, т. е. систему, движущуюся в определенной степени нерегулярно. Сейчас о такой системе говорят как о синергетической с фрактальным видом траектории движения. Воздействие на Землю Солнца, Луны, остальных планет Солнечной системы с их многочисленными спутниками проявляется в виде малопредсказуемых небольших по космическим меркам изменений орбиты Земли вокруг Солнца.

В истории нашей планеты было несколько глобальных геологических кризисов, повторяющихся с периодичностью 180 и 30 млн. лет. Столь значительные периоды характерны только для процессов космических масштабов. Большой период соответствует галактическому году – времени обращения Солнечной системы вокруг центра Галактики, второй – периоду вертикальных колебаний Галактики около галактической плоскости. Для Земли наиболее важными являются изменения ее орбитальных параметров. При возрастании угловой скорости планеты ее форма становится более сплюснутой, полярные области испытывают сжатие, а экваториальные – растяжение. В растягивающихся областях земная кора растягивается и проседает, образуются значительные по протяженности трещины, из которых извергается лава. При сжатии коры глыбы громоздятся друг на друга и сминаются в складки.

Наличие в земной коре аномально большого количества химических элементов с большими атомными весами (элементы с тяжелыми ядрами) может быть объяснено тем фактом, что Солнечная система при своем сложном движении пролетает области космического пространства, занятые туманностями с тяжелыми элементами. Известно, что наиболее богаты тяжелыми элементами спиральные галактики, особенно в рукавах, образованных газопылевыми комплексами. Галактика Млечный Путь устроена таким образом, что Земля периодически проходит через области максимальных плотностей пылегазовых образований. Земля втягивает на свою поверхность огромное количество космической пыли, в этой связи из

всех планет Солнечной системы наша планета имеет в своей коре самый широкий ассортимент химических элементов. Подтверждением такого видения являются анализы марсианской пыли, которая состоит преимущественно из железа и магния метеоритного происхождения.

Неоспоримым и значащим фактором земной эволюции является биосфера, возникшая около 4,5 млрд. лет назад, т. е. спустя совсем непродолжительное время после образования планеты. Общеизвестно, что биосфера активно участвовала на протяжении всего времени эволюции в формировании осадочных горных пород, составляющих ощутимую часть земной коры.

В результате эволюции верхних слоев Земли, включая биосферу, трансформировалась атмосфера планеты и ее гидросфера. Атмосфера и гидросфера образовались вследствие дегазации магмы, выносимой из толщи мантии на поверхность. Газы в условиях огромных давлений в мантии находились в растворенном состоянии – в виде молекул пара. При выбрасывании магмы наверх давление резко падало, растворенные газы переходили в свободное состояние в виде сферических полостей, которые на поверхности схлопывались (коллапсировали). Подобный бурный и красочный эффект наблюдается всякий раз при откупоривании шампанского.

Значительную роль в эволюционных процессах верхних слоев Земли играет движение воды. Вода, находящаяся на поверхности планеты, составляет только некоторую часть общепланетного запаса. Вода внутри земной коры находится в виде солевых растворов, циркулирующих по трещинам и пластам, а также в виде составной части кристаллических решеток некоторых минералов, прежде всего серпентинов. В прежние времена, как и теперь, имел место процесс обмена водой, находящейся на поверхности и внутри земной коры.

Земля в масштабах Вселенной или даже Галактики представляет собой небольшой космический объект, смертную структуру с фактом рождения, развития, зрелостью и неизбежным угасанием, которое, возможно, совпадет по времени с завершением дрейфа железа к центру Земли.

Определяющим, а возможно, и уникальным явлением эволюционного процесса на Земле стало появление жизни. Это не стало бы возможным, если бы планета не была окутана газовой оболочкой высотой в несколько сотен километров. И жизнь в теперешнем виде не могла возникнуть, если бы атмосфера молодой планеты содержала свободный кислород.

На высоте более 100 км под действием ультрафиолетовой части электромагнитного излучения Солнца молекулы водяного пара диссоциируют на водород и гидроксил. Два гидроксильных радикала затем соединяются, образуя молекулу перекиси водорода, которая в течение непродолжительного времени разлагается на свободный кислород и воду. Цикл превращений повторяется. Тяжелые молекулы кислорода O_2 , имеющие молярную массу $\mu(O_2) = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, под действием гравитационных сил опускаются к поверхности, а легкие молекулы водорода массой $\mu(H_2) = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль поднимаются в верхние слои атмосферы, где температуры таковы, что тепловые скорости их движения превышают первую космическую скорость:

$$\langle v \rangle \cong \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \cong 8,64 \frac{\text{км}}{\text{с}},$$

что всего в 1,3 раза ($v_{2к} \cong 11,2$ км/с) меньше второй космической скорости. В уравнении, являющимся следствием основного уравнения молекулярно-кинетической теории, приняты следующие обозначения: $R \cong 8,314$ Дж/(моль·К) –

универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса; T – абсолютная температура.

Атмосфера по своей высоте имеет весьма специфическое, нелинейное распределение температур (рис. 7.10). Если придерживаться мнения, что все планеты Солнечной системы возникли из одного и того же протопланетного вещества, то начальная земная атмосфера должна была быть близкой по составу к атмосферам планет-гигантов – Урана, Сатурна и Юпитера, которые благодаря своим внушительным массам смогли удержать в гравитационном поле значительную часть легких компонентов газообразного вещества. В атмосферах этих массивных планет сохранились такие газы, как аммиак, метан и даже водород.

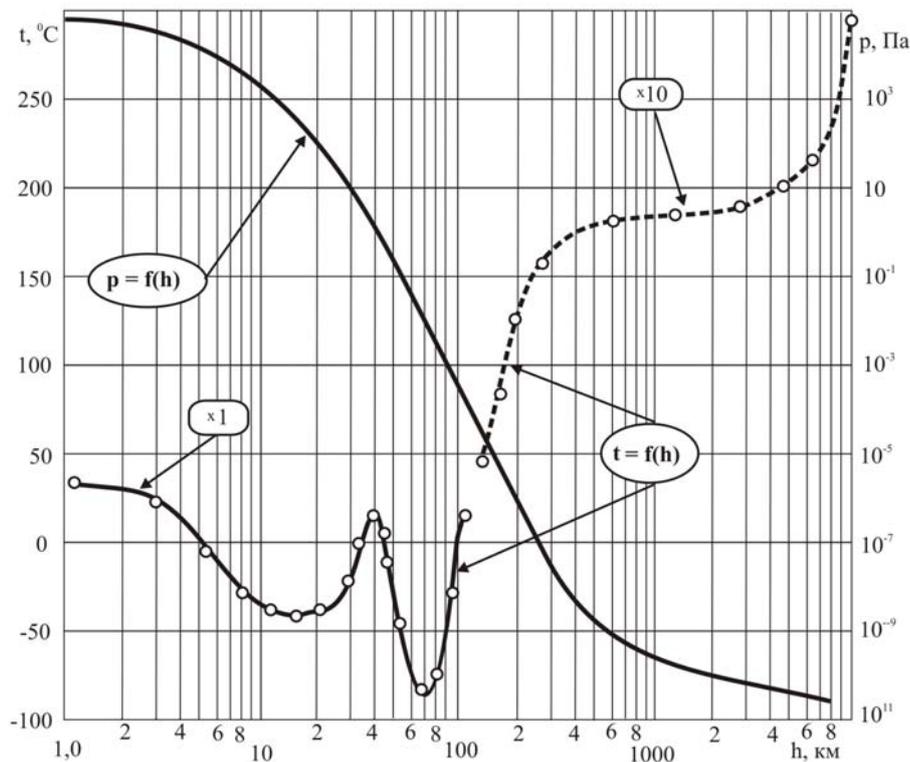


Рис. 7.10. Распределение температур и давлений в атмосфере

Первичная атмосфера Земли оказалась неустойчивой, ее сдуло, предположительно, солнечным ветром, поэтому в современной атмосфере практически отсутствует водород. Водород сохранился только в самых верхних слоях атмосферы, где он синтезируется в процессе фотодиссоциации паров воды при воздействии ультрафиолетового излучения Солнца. Однако в верхней атмосфере водород долго не задерживается, улетая в космическое пространство. Покинувший земную атмосферу водород образует водородную корону, занимающую несколько тысяч километров.

Кроме того, первичная атмосфера претерпела изменения как бы изнутри, при эволюции Земли. В результате работы вулканов выбрасывалось огромное количество газов в виде углекислоты (CO_2), сероводорода (H_2S), аммиака (NH_3), цианистого водорода (HCN) и прочих газообразных продуктов вулканической деятельности. Продукты начавшейся к тому времени фотодиссоциации, особенно кислород, активно окисляли вулканические газы. Образующиеся при этом окислы под действием силы тяжести опускались к поверхности Земли. Это, по сути, была уже атмосфера второго поколения, основным свойством которой было незначительное

количество свободного кислорода.

Дополнительным подтверждением нестабильности земной атмосферы может служить мизерное количество инертных газов по сравнению с их распространенностью в космическом пространстве, включая околоземное. Инертные газы потому так и были прозваны, что они крайне редко вступали в соединения с другими веществами, т. е. не образовывали на протяжении истории Земли тяжелых соединений. По этой причине они, подобно водороду, разогрелись до второй космической скорости ($\langle v \rangle \approx \sqrt{T}$) и покинули атмосферу.

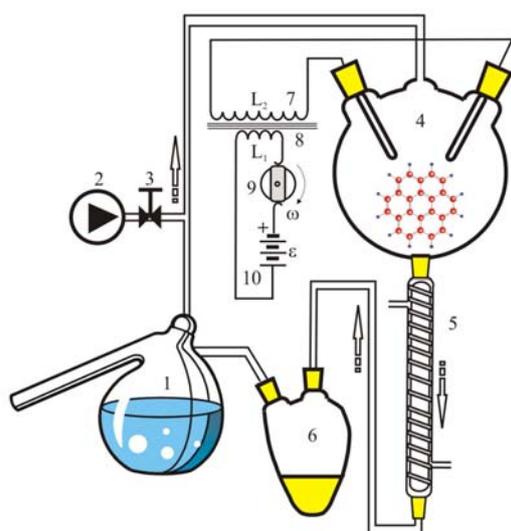


Рис. 7.11. Установка Стэнли Миллера

Ультрафиолетового излучения $\lambda = 2-2,5 \cdot 10^{-10}$ м, которое при отсутствии озонового слоя в ранней атмосфере было вполне вероятным. В настоящее время указанный диапазон ультрафиолетового излучения Солнца поглощается озоновым слоем. При проведении облучения в течение нескольких десятков часов в реакторе образовывался целый набор аминокислот. При добавлении в реактор соединений серы образовывались достаточно протяженные полимерные молекулы, включающие в свой состав углеводородные цепочки.

В колбе 1 кипела вода, обеспечивая выделение водяного пара, вакуумный насос 2 и кран 3 позволяли удалять атмосферный воздух и водяные пары. Реактор 4 содержал смесь газов метана CH_4 , аммиака NH_3 , водяных паров H_2O , водорода H_2 , моделирующих ранний состав земной атмосферы. В реакторе происходили электрические разряды высокого напряжения, получаемого с помощью устройства, состоящего из катушек L_1 (7) и L_2 (8), механического прерывателя 9 и источника постоянного напряжения 10. Продукты реакции подавались в охладитель 5 и накопитель продуктов реакции 6. Кроме упомянутых газов в процессе эксперимента в реактор добавлялось некоторое количество серы, игравшей роль катализатора.

Сейчас трудно установить личность конкретного человека, открывшего атмосферу. Более двух тысяч лет ученые постепенно составляли представление об уникальной газовой оболочке Земли.

Античные ученые считали воздух одной из основных мировых субстанций, которая способна разделяться на более простые составляющие. Следует заметить, что многие древние греки, включая Аристотеля, в своих схемах мироздания не отводили места пустоте как таковой. Заканчивалась земная твердь, начинался слой воды (океана), океан плавно переходил в небо, состоящее из воздуха, воздушная оболочка граничила с оболочкой огня, за которой сразу начинались необозримые

В 1953 г. Стэнли Миллер в лабораторных условиях успешно провел моделирование физико-химических условий на ранней Земле. В частности, в специальной установке (рис. 7.11) был осуществлен синтез органических веществ из неорганических молекул CO , CO_2 , CH_4 , HCN , H_2O .

Различные комбинации газов, имевшие место в ранней атмосфере Земли, подвергались воздействию ультрафиолетового излучения, получаемого при высоковольтных разрядах. Миллеру и его продолжателям удалось синтезировать ряд аминокислот, аденин, глицин, глутаминовую кислоту и простые сахара.

Было установлено, что наиболее эффективно синтез протекает в диапазоне

просторы, занятые эфиром. Среди натуралистов бытовало мнение: «Природа не терпит вакуума». Вакуум в переводе с латинского – ничто. Это утверждение, казалось, подтверждалось наблюдениями.

В Древней Греции было сделано много очень важных для практической деятельности человека изобретений. Были придуманы и реализованы, как бы теперь сказали, «в металле» многочисленные машины и механизмы, принцип действия которых используется и в настоящее просвещенное время. К таким творениям древних инженеров относится водяной насос.

Принцип действия такого насоса объяснялся свойством природы бояться пустоты. По Аристотелю, таким устройством можно было поднимать воду на любую высоту. Однако на практике при откачивании грунтовых вод из шахт обнаружилось, что максимально возможная высота составила всего около 10 метров.

Почему происходило именно так, не смог разобраться даже Галилео Галилей (1564–1642 гг.). Он пришел к выводу, что природа не терпит пустоты только до вполне определенного предела. «Парадокс» был объяснен учеником Галилея Эванджелистой Торричелли (1608–1647 гг.), который в 1644 г. провел эксперименты с ртутью – жидкостью, в 13,5 раза более плотной, чем вода.

Заполнив запаянную с одного конца стеклянную трубку длиной 0,914 м ртутью и закрыв свободный конец трубки пальцем, Торричелли перевернул ее и погрузил в чашу с ртутью. Открыв конец трубки, ученый обнаружил, что ртуть вылилась из трубки только частично. В трубке остался столбик жидкого металла высотой 762 мм над уровнем жидкости в чаше.

Так было открыто атмосферное давление и изобретено устройство для его измерения – барометр. Когда ртуть была заменена водой, то для продолжения экспериментов потребовалась более длинная трубка. Столб воды составил 9,9 м. Поделив высоту столба воды на высоту столба ртути, Торричелли обнаружил, что высоты отличаются в 13,546 раз, т. е. отношение высот столбов жидкостей в точности равно отношению их плотностей. Так появилась на свет знаменитая формула для определения величины атмосферного давления:

$$p_0 = \rho_L g h_L,$$

где ρ_L – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения, измеренное Галилеем; h_L – высота столба жидкости. Размышляя над полученными результатами, ученые сделали предположение, что воздух, имея конечный вес, должен обладать и конечной высотой. В соответствии с уравнением и измерениями Торричелли ($p_0 \cong 10^5$ Па \cong 762 мм рт. ст.) на каждый квадратный метр поверхности s действует сила $F = 10^5$ Н. Принимая плотность воздуха $\rho_G \cong 1$ кг/м³ постоянной по высоте атмосферы (распределение давлений и плотностей с высотой, приведенные на рис. 2.15, еще были неизвестны), была вычислена высота атмосферы:

$$F = mg, \quad m = \frac{F}{g} \approx 10^4 \text{ кг}, \quad m = \rho_G s h,$$

$$h = \frac{m}{\rho_G s} = \frac{F}{g \rho_G s} = \frac{p_0}{\rho_G g} \cong 10 \text{ км}.$$

В XVII в. английский физик и химик Джон Миов на основании своих опытов установил, что в состав воздуха входит субстанция, обеспечивающая процессы горения. Он назвал эту субстанцию «горючим воздухом».

Кислород в чистом виде был выделен в Англии спустя столетие одновременно двумя учеными – Джозефом Пристли и Карлом Шелее из ртути. Ртуть нагревалась в атмосфере воздуха до превращения в красный порошкообразный материал. Даль-

нейшее нагревание порошка приводило к выделению из него газа, который поддерживал горение лучше обычного атмосферного воздуха. Это был кислород.

Азот был открыт в 1752 г. шотландским физиком Джозефом Блэком (1728–1799) путем его выделения из состава воздуха. Блэк назвал эту компоненту «связанным воздухом». Позже, через двадцать лет, в Шотландии Даниэл Резерфорд (1749–1819 гг.), ботаник, врач и химик, при изучении газа, образующегося при сгорании древесного угля, выделил в чистом виде азот, который назвал «удушливым газом».

Термин «газ» применительно к атмосфере начал использовать фламандский химик Ян Баптист ван Гельмонт (1579–1644 гг.), который изучал газообразные продукты брожения фруктовых соков, состоящих в основном из углекислого газа. Генри Кавендиш (1731–1810 гг.), человек, взвесивший Землю, обнаружил горючий газ, который был назван водородом.

В 1770 г. Антуан Лоран Лавуазье (1743–1794 гг.), французский химик и физиолог, повторяя опыты с нагреванием ртути в воздушной среде, выделил в составе атмосферы два газа: кислород, который поддерживает горение, и азот – «мертвый» газ, который реакции окисления не поддерживает.

К середине XIX века было установлено, что состав атмосферы одинаков для всех точек поверхности Земли. При этом выяснилось, что в составе атмосферы кислород составляет только 20,9%, остальное количество приходится на азот.

Наличие прочих газов, присутствующих в малых количествах, было обнаружено позже. Знаменитый английский исследователь-универсал Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей) (1842–1919 гг.) обнаружил, что азот, выделенный из воздуха, тяжелее азота, полученного из химикалий. Из этого следовало, что в атмосферном азоте присутствует некая газовая субстанция, не обнаруживающая себя в химических реакциях. Спектроскопические исследования атмосферного азота показали, что исследователи имеют дело с двумя газами. Утяжеляющим азот газом оказался инертный газ – аргон. Позже, в 1890 г., Уильям Рамзай (1852–1916 гг.) обнаружил в составе атмосферы еще четыре инертных газа: неон («новый»), криптон («спрятанный»), ксенон («странник») и гелий, который за тридцать лет до этого был найден на Солнце. С появлением инфракрасной спектроскопии список составных частей атмосферы пополнили новые газы: закись азота («веселящий газ»), метан – продукт распада растений и живых организмов и окись углерода.

Перед тем как начать обсуждение особенностей устройства отдельных слоев земной атмосферы, следует заметить, что четкой границы, где заканчивается атмосфера, выделить нельзя: газовый слой над нашей планетой постепенно переходит в космическое пространство, которое, строго говоря, нельзя назвать пустотой. Процесс сгорания метеоритов наблюдается на значительных высотах, где давление в миллион раз меньше, чем на поверхности, а плотность воздуха составляет миллиардную часть плотности атмосферы на поверхности. Северные сияния время от времени наблюдаются на высотах порядка 800–1300 км над уровнем моря.

В распоряжении просвещенного европейского человечества была только гора Монблан во Франции высотой около 4,8 км, что позволило исследовать свойства атмосферы именно до этого уровня. На рис. 7.12 показана структура атмосферы по высоте.

Освоение высот посредством воздушных шаров после изобретения братьев Монгольфье открыло новые возможности исследования свойств атмосферы. Англичанин Джон Джеффрис впервые совершил путешествие на воздушном шаре вокруг Лондона, имея на борту барометр, термометр и устройства для забора воздуха.

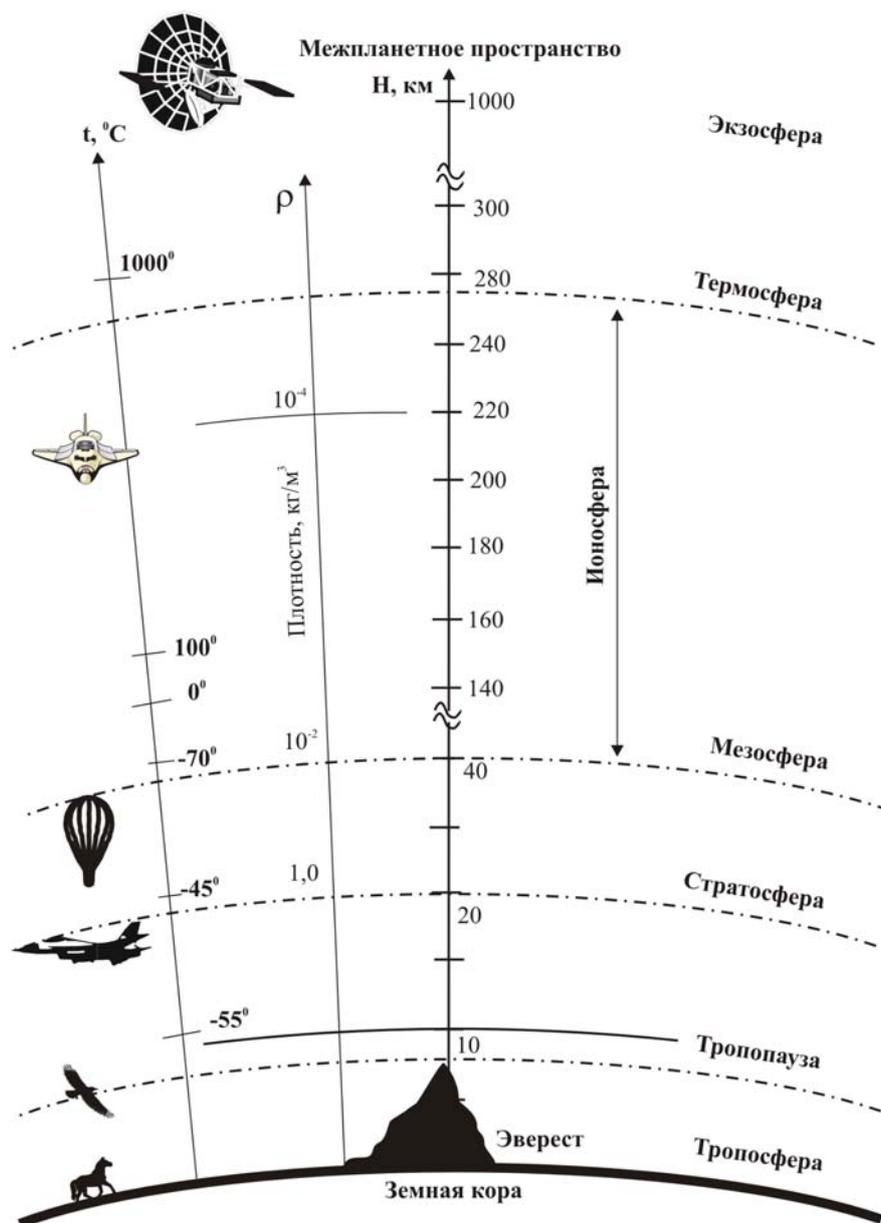


Рис. 7.12. Строение атмосферы

В 1804 г. французский физик Джозеф Луи Гей-Люссак (1778–1850) поднялся на воздушном шаре, наполненном водородом, с приборами на высоту более 7 км и взял несколько проб разреженного воздуха. Гей-Люссак, а затем и Жан-Пьер Бланкар после своих воздушных полетов описали симптомы кислородного голодания, после чего были разработаны беспилотные средства, обеспечивающие получение информации о давлении и температуре. С помощью беспилотных шаров-зондов было установлено, что на высоте 11 км температура атмосферного воздуха, измеряемая термометрами, составляет -55°C , но с дальнейшим увеличением высоты температура по непонятным причинам увеличивается.

Этот феномен исследователи пытались объяснить наличием в атмосфере слоев с существенно различными аэродинамическими характеристиками. Нижний слой, по мнению метеорологов, имел ярко выраженный турбулентный режим движения воздуха, характеризующийся интенсивными переносами масс и тепла. Наблюдае-

мые на поверхности Земли достаточно продолжительные переменные перемещения больших воздушных масс давали к этому все основания. Этот турбулизированный слой, состоящий из азота, кислорода и паров воды, был назван тропосферой, что в переводе с греческого означает «сфера изменений». Более высокий слой, заключающий в себя молекулы таких легких газов, как гелий и водород, был назван стратосферой, что соответствовало опять же греческому понятию «многослойная среда». Часть атмосферы, где скорость изменения температуры была равна нулю, получила название тропопаузы. Тропопауза в экваториальных районах обнаруживается на высотах порядка 16 км, а ближе к полюсам уровень тропопаузы опускается до 8 км относительно уровня моря.

Во времена Второй мировой войны бомбардировочная авиация СССР и союзников, спасаясь от зенитных снарядов, была вынуждена подниматься на максимально возможные для двигателей высоты. Пилотами отмечалось, что на нижней границе тропопаузы наблюдаются в направлении с запада на восток воздушные течения, скорость которых достигает 2 000 км/ч. Естественно, что такие течения планетарного масштаба должны оказывать влияние на динамику воздушных масс и в нижних слоях.

Поскольку возможности авиации до появления реактивных двигателей и ракет были ограничены, то покорение воздушного океана продвигалось в направлении создания герметичных гондол, транспортируемых газонаполненными шарами. Швейцарский физик Огюст Пикар (1882–1962), сконструировавший первый батискаф, перенес принцип его конструкции на летательный аппарат. В 1931 г. в аэростате братьев Пикар аэронавты достигли высоты 17,6 км. Совершенствование конструкции несущих оболочек аэростатов позволило человеку достичь высоты 34 км, а беспилотные аппараты поднимать на высоту более 45 км. В процессе полетов в стратосферу было установлено, что область постоянной температуры не распространяется бесконечно. Границы стратосферы располагались на высоте 20 км, дальше температура начинала увеличиваться. Дальнейшие исследования свойств атмосферы продолжились с помощью ракет, известных в Китае с незапамятных времен и использовавшихся для создания фейерверков. В 1809 г. английский эксперт по артиллерийскому вооружению, проанализировав случаи применения ракет на Востоке в основном в психологических целях, пришел к заключению о возможности их использования для транспортировки взрывчатки.

Первое практическое применение ракетной технологии было осуществлено в СССР, когда на вооружении армии и флота появились знаменитые «катюши». В Германии ко времени окончания Второй мировой войны было выпущено 4 300 ракет конструкции Вернера фон Брауна, 1 230 из которых были обрушены на Лондон. В 1949 г. ракета Брауна V-5 поднялась на совершенно недостижимую для авиации высоту – 205 км. Примерно в это же время инициативу по использованию ракет для доставки на большую высоту гидрометеорологических приборов перехватил Советский Союз, который к 1950 г. стал абсолютным лидером в ракетостроении.

Ракеты, снабженные средствами телеизмерений, изобретенными отечественным ученым Петром Молчановым в 1925 г., позволили выяснить, что температура за пределами стратосферы увеличивалась до -10°C , а на высоте 80 км снова падала до -90°C . Эта область получила название мезосферы. На высотах более 480 км атмосфера представляет собой разреженный газ, состоящий из молекул водорода и гелия. Температура в этом атмосферном пространстве не представляет собой величину в обиходном понимании, а является следствием скорости движения немногочисленных молекул с большими величинами длин свободного пробега. Если на такую высоту, где, согласно законам термодинамики, температура составляет

+1000°C, поместить яблоко, то оно не нагреется, а мгновенно превратится в твердое тело. Да, молекулы газа действительно движутся со впечатляющими скоростями, но их очень мало, чтобы нагревать даже самые маленькие тела. Эта часть атмосферы была названа термосферой (сфера тепла).

Выше термосферы располагается достаточно размытый слой разреженного газа, который получил название экзосферы. Экзосфера примыкает к открытому космосу, это уже межпланетное пространство. Эра ракет ознаменовалась в 1957 г. запуском в СССР первого искусственного спутника – предшественника околоземных космических станций, наблюдение за атмосферой с которых стало вполне обыденным делом.

В нижнем пятикилометровом слое атмосферы Земли сосредоточено 50% ее массы, в шестнадцатикилометровом слое – 90%, а в тридцатикилометровом – 99%. Один кубический метр воздуха на уровне моря имеет массу 1,033 кг, а на высоте 40 км – всего 4 г.

Кроме вышеупомянутых газов в атмосфере в относительно малом количестве содержится озон (от греческого слова *ozon* – «пахнущий»), представляющий собой аллотропную модификацию кислорода O_3 . Озон, газ синего цвета с резким запахом и температурой кипения $-111,9^\circ C$, является сильным окислителем. Озон образуется из молекул кислорода O_2 при электрических разрядах во время грозы и под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Основная масса O_3 в атмосфере расположена на высотах от 10 до 50 км с максимальной концентрацией на высоте 20–25 км. Если озон выделить из всей атмосферы и сконцентрировать его в одном месте при нормальном атмосферном давлении $p_0 = 10^5$ Па, то образуется сферический слой толщиной 2–3 мм. Озон составляет по массе только одну миллионную часть массы всей атмосферы, однако он несет существенные защитные функции, заключающиеся в чрезвычайно интенсивном поглощении электромагнитного излучения Солнца в ультрафиолетовом диапазоне с длинами волн меньше $\lambda \leq 2 \cdot 10^{-7}$ м.



Рис. 7.13. Материки в Мировом океане

т. е. $3,61 \cdot 10^8$ км². Всего на Земле, по последним оценкам ученых, сосредоточенно $1,5 \cdot 10^{18}$ т воды, при этом в Мировом океане запасено воды $13,41 \cdot 10^8$ км³, т. е. 97,2%. Океан является одним из основных источников пресной воды.

Мировой океан делится материками на четыре части: Атлантический, Тихий, Индийский и Северный Ледовитый океаны. Средняя глубина океанских вод составляет 3711 м, наибольшая глубина – 11 022 м (Марианская впадина).

Океан. В Солнечной системе есть лишь одна планета – Земля, на которой вода одновременно пребывает в трех фазовых состояниях – твердом, жидком и парообразном. Пары воды, в свою очередь, при соответствующих условиях диссоциируют, разлагаясь на водород и гидроксил.

Если смотреть на Землю из необъятных просторов космоса (рис. 7.13), то она представляется в виде шара, покрытого водой, в которой «плавают» материки. Площадь поверхности Земли $S \cong 4,99 \cdot 10^8$ км², океан при этом покрывает около 71%,

Наиболее крупные океаны – Тихий, Атлантический и Индийский. Тихий океан (площадь около $178,62 \cdot 10^6 \text{ км}^2$) имеет в плане округлую форму и занимает почти половину водной поверхности земного шара. Атлантический океан ($91,56 \cdot 10^6 \text{ км}^2$) имеет форму широкой буквы S, причем его западное и восточное побережья почти параллельны. Индийский океан площадью $76 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ имеет форму треугольника.

Северный Ледовитый океан площадью всего $14,75 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ почти со всех сторон окружен сушей. Как и Тихий, он имеет округлую в плане форму. Некоторые географы выделяют еще один океан – Антарктический, или Южный, – водное пространство, окружающее Антарктиду.

Мировой океан, средняя глубина которого составляет около 3,7 км, содержит примерно $1,34 \cdot 10^9 \text{ км}^3$ воды. Атмосферу, окутывающую всю Землю слоем толщиной в несколько сотен километров, с гораздо большим основанием, чем Мировой океан, можно рассматривать как своеобразную «оболочку», отделяющую водную массу от космического пространства. Океан и атмосфера представляют собой соответственно среды в жидком и газообразном состоянии, в которых развилась и существует жизнь; их свойства определяют среду обитания организмов.

Циркуляционные потоки в атмосфере влияют на общую циркуляцию воды в океанах, а от состава и температуры воздуха в сильной степени зависят свойства океанических вод. В свою очередь, океан определяет основные свойства атмосферы и является источником энергии для многих протекающих в атмосфере процессов. На циркуляцию воды в океане влияют ветры, вращение Земли и материка.

Известно, что температурный режим и другие климатические характеристики местности в окрестностях любого континента изменяются по направлению от побережья океана в глубь материка. Особенно это заметно, например, при перемещении из Петропавловска-Камчатского в глубь полуострова. По сравнению с сушей океан медленнее нагревается летом и медленнее остывает зимой, сглаживая колебания температуры на прилегающей к нему суше.

Даже на расстоянии 20–25 км от Петропавловска в зимнее время уже можно зафиксировать понижение температуры. Атмосфера получает от океана значительную часть поступающего к ней тепла и практически весь водяной пар. Молекулы водяного пара поднимаются, конденсируются, образуя капельную форму жидкости – облака, которые переносятся в атмосфере на значительные расстояния в глубь материков, поддерживая на планете все формы жизни, орошая землю дождями или снегами. В процессах теплообмена и обмена влагой участвуют только поверхностные слои водной массы океана; более 95% всей воды находится в глубинах, где ее температура остается практически неизменной. На глубинах два и более километров температура во всех четырех океанах составляет одну и ту же величину – от +2 до +3°C.

Средняя годовая температура поверхности воды составляет 17,5°C, в районе экватора температура максимальна ($\cong 28^\circ\text{C}$), по мере приближения к полюсам она падает, уменьшаясь до 1,9°C. Следует отметить незначительный разброс температур поверхности воды в трех земных океанах: Тихий – +19,4°C, Индийский – +17,3°C, Атлантический – +16,5°C (ср.: Ледовитый – +2,5°C).

С поверхности Мирового океана каждые сутки в атмосферу испаряется $9,15 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ пресной воды. В водах океанов растворено 44 химических элемента. Общее количество солей по массе составляет $\cong 5 \cdot 10^{16} \text{ т}$.

Если бы стало возможным все соли океанов выпарить и приготовить в виде сухого остатка, то им можно было бы покрыть всю поверхность Земли слоем высотой 150 м. из всех химических элементов более всего в морской воде содержится кислорода, который, в частности обеспечивает жизнедеятельность живых орга-

низмов. Исследования океанологов и ихтиологов обнаружили, что содержание кислорода неодинаково по глубине. Максимальная концентрация наблюдается в поверхностных слоях, однако даже на дне Марианской впадины на глубине более 11 км имеется кислород, о чем свидетельствуют обнаруженные там живые организмы.

Вода в океане, как известно, соленая. Такой вкус ей придают содержащиеся в ней 3,5% растворенных минеральных веществ. Это, главным образом, соединения натрия и хлора – основные ингредиенты столовой соли NaCl. Следующим по количеству является магний, за ним следует сера; присутствуют также все известные человеку металлы. Из неметаллических компонентов особенно важны кальций и кремний, так как именно они участвуют в строении скелетов и раковин многих морских животных. Благодаря тому что вода в океане постоянно перемешивается волнами и течениями, ее состав почти одинаков во всех океанах.

Плотность морской воды при температуре 20°C и солености около 3,5% составляет примерно $1,03 \cdot 10^3$ кг/м³, т. е. несколько выше, чем плотность пресной воды ($1 \cdot 10^3$ кг/м³). Плотность воды в океане меняется с глубиной, потому что силы всестороннего сжатия сближают молекулы друг с другом, увеличивая их количество в единице объема. Плотность воды зависит также от температуры и солености. В наиболее глубоких частях океана вода обычно солонее и холоднее. Наиболее плотные массы воды в океане могут оставаться на глубинах и сохранять пониженную температуру по сравнению с поверхностью 1000 лет и более.

Поскольку морская вода имеет относительно низкую вязкость и достаточно высокие значения коэффициента поверхностного натяжения, она оказывает относительно слабое сопротивление движению в ней твердых тел и быстро стекает с различных поверхностей. Преобладающая синяя окраска морской воды связана с рассеянием солнечных лучей взвешенными в воде мелкими частицами.

Морская вода менее прозрачна для света по сравнению с воздухом. Однако учеными зарегистрировано проникновение солнечных лучей в океан до 700 м. Радиоволны проникают в толщу воды на несколько сантиметров, в то время как низкочастотные звуковые волны могут распространяться под водой на сотни километров. Скорость распространения звука в морской воде колеблется, составляя в среднем около 1500 м/с. Электропроводность морской воды в 4 000 раз выше, чем электропроводность пресной воды.

На дне Мирового океана находятся горные хребты, глубокие расселины с обрывистыми стенками, протяженные гряды и глубокие рифовые долины. Океанское дно изрезано не менее, чем поверхность суши, причем перепады горных высот намного существеннее, чем на суше.

Часть океана, ограничивающая континенты, называется материковой отмелью, или шельфом. На внешней части шельфа, как правило, имеются в изобилии скальные выступы. Коренные породы часто выходят и на примыкающую к шельфу часть материкового склона. Средняя глубина внешнего края (бровки) шельфа, отделяющего его от материкового склона, составляет около 130 м. У берегов, подвергавшихся в прошлом оледенению, на шельфе часто отмечаются ложбины и впадины. Так, у берегов Норвегии, Аляски, на юге Чили глубоководные участки обнаруживаются вблизи современной береговой линии; глубоководные ложбины существуют у берегов штата Мэн и в заливе Св. Лаврентия. Выработанные ледниками трещины часто тянутся поперек всего шельфа; местами вдоль них располагаются исключительно богатые рыбой отмели, например шельфовая зона Охотского и Берингова морей.

Шельфы, не тронутые оледенением, имеют более однообразное строение, од-

нако и на них часто встречаются песчаные или даже скальные гряды, возвышающиеся над общим уровнем. В ледниковую эпоху, когда уровень океана понизился вследствие того, что огромные массы воды сконцентрировались на суше в виде ледниковых покровов, в многочисленных местах были созданы речные дельты.

На внешнем шельфе можно обнаружить отложения, образовавшиеся в прошлом, когда уровень океана был более чем на 100 м ниже современного. Там достаточно часто находят кости мамонтов, живших в ледниковую эпоху, а иногда и орудия первобытного человека.

Материковые склоны обычно образуют четкую и хорошо выраженную границу с шельфом, кроме того, почти всегда его пересекают глубокие подводные каньоны. Средний угол наклона на материковом склоне составляет около 4° , но встречаются и более крутые, иногда почти вертикальные участки. У нижней границы склона в Атлантическом и Индийском океанах располагаются пологонаклонные поверхности, так называемые материковые подножья.

По периферии Тихого океана материковое подножье обычно отсутствует; его часто замещают глубоководные желоба, где тектонические подвижки порождают землетрясения, которые очень хорошо знакомы жителям Китая, Японии и Камчатки. Подводные землетрясения являются причиной зарождения большого количества цунами.

На дне Мирового океана располагаются каньоны, врезанные в морское дно на 300 м и более, обычно эти каньоны отличаются крутыми бортами, узким днищем, извилистостью в плане; как и их аналоги на суше, они принимают многочисленные притоки. Самый глубокий из известных подводных каньонов – Большой Багамский, который врезан на глубину около 5 км. Несмотря на внешнее сходство с подобными наземными образованиями, подводные каньоны, как правило, не являются бывшими речными долинами, погруженными ниже уровня океана. Конфигурация подводных долин постоянно изменяется, потому что по ним происходит перемещение наносов. Свидетельством тому является волнообразная рябь на дне, от чего глубина их меняется.

В толще вод океанов и морей имеется циркуляция жидкости, которая и является причиной попадания кислорода на столь значительные глубины. Вертикальная циркуляция обеспечивается разностью температур воды на поверхности и в придонных слоях. Вода, находясь в северных районах земного шара, охлаждается, плотность становится выше, что вызывает ее погружение. Место охлажденной воды занимает более теплая, а охлажденные массы распространяются в придонных областях, чтобы на значительных расстояниях от полюсов где-то снова всплыть и нагреться в приповерхностном слое. Вновь нагретая вода начинает свой долгий путь в направлении Арктики и Антарктики. Время полной циркуляции в Атлантическом океане, по оценке исследователей, составляет примерно 1000 лет, а в Тихом океане, который больше по площади, – вдвое больше.

Встречающиеся на пути циркуляционных потоков материи усложняют картину течений. В 1796 г. Бенджамин Франклин, чей портрет красуется на стодолларовых купюрах, обнаружил в океане огромную теплую «реку» – Гольфстрим, которая имеет среднюю скорость течения 6,4 км/ч, глубину около 800 м и ширину 80 км. Это самая большая «река» на Земле. Течение переносит в секунду примерно в 1500 раз больше воды, чем Миссисипи.

Океанские течения со временем были исследованы и нанесены на карты. В Северном полушарии все течения, вследствие действия силы Кориолиса, движутся в океане по часовой стрелке. В районах экватора сила Кориолиса практически равна нулю, что вызывает тонкие прямолинейные течения, обнаруженные в Тихом и

Атлантическом океанах. В Тихом океане американский океанолог Таунсенд Кромвелл открыл течение, распространяющееся вдоль экватора на восток на расстояния в несколько тысяч километров. В Атлантическом океане тоже имеется более медленное экваториальное течение.

В Северном Ледовитом океане берет свое начало и движется по дну Атлантики, проходя под Гольфстримом, еще одно мощное течение. В Тихом океане такого течения нет, его образованию мешает относительно узкий пролив Беринга, что превращает северную часть Тихого океана в своеобразный тупик.

Ученые достаточно подробно исследовали структуру океанских течений по содержанию в воде кислорода. Дело в том, что холодная вода содержит больше кислорода, чем теплая. На «макушках» Земли, таким образом, в воде содержится наибольшее количество кислорода. Нормируя содержание кислорода относительно максимума, можно проследить океанские течения.

Океан для людей представляет интерес по многим фундаментальным и прикладным причинам. Океан во многом формирует климат на Земле, являясь естественным терморегулятором, он поддерживает состояние динамического равновесия с атмосферой. Кроме того, воды океанов и морей являются своеобразными короткими транспортными артериями, по которым наиболее экономически выгодно перемещать на значительные расстояния хозяйственные грузы.

Никакие другие транспортные средства не сравнятся по грузоподъемности с морскими судами. Океан, наряду с атмосферой планеты, стал стратегическим плацдармом для организации военных приготовлений. Глубины океана и его необъятные просторы открывают широкие возможности скрытной дислокации подводного и надводного оружия. Военными ведомствами развитых стран были выполнены многие исследования физических параметров океана, особенно это касается вопросов гидроакустики и гидрологии. Температурное состояние океана оказывает непосредственное влияние на разнообразные процессы в атмосфере, т. е. определяет широкий спектр явлений, объединяемых понятием «климат».

Слово климат происходит от греческого слова *klimax*, что означает наклон (земной поверхности к направлению солнечных лучей). Климат представляет собой набор многолетних данных о режимах погоды, являясь основным параметром, определяющим географические характеристики местности. Параметры климата зависят от географического положения региона и свойств так называемой подстилающей поверхности. Поскольку большая часть площади Земли покрыта водой, то температурный режим поверхностного слоя водных масс существенно влияет на климат.

Работа природной тепловой машины, с чрезвычайно сложными и многообразными геофизическими, гидродинамическими, термодинамическими и астрофизическими взаимосвязями, не поддается полному аналитическому описанию.

Ученым удается анализировать только некоторые частности ее функционирования и фиксировать отдельные фазы состояния. Так, например, спутниковые и наземные наблюдения позволяют фиксировать зарождение и развитие циклонов, что является чрезвычайно важным для всех тех, кто по роду своей деятельности связан с работой в океане или находится в непосредственной близости от береговой линии.

По количеству непонятных ученым явлений Мировой океан не уступает телам космического происхождения, таким как Солнце, Луна и другие планеты и звезды, и это несмотря на то, что находится, не в пример последним, ближе к наблюдателям. Причем загадки огромного водного пространства нашей планеты множатся по мере развития теоретических и экспериментальных методов исследований. Так,

например, уже в космическую эпоху исследований с помощью спутниковых наблюдений была развеяна царившая долгое время идея нулевого уровня поверхности океана. Оказалось, даже при абсолютном штиле океанская поверхность имеет рельеф, стабильно обнаруживаются пять перепадов уровня поверхности. Поверхность Индийской аномалии опущена относительно общего уровня на 112 м, Калифорнийская аномалия опущена на 56 м, Австралийская, наоборот, – поднята на 78 м, Карибская – опущена на 60 м, Северо-Атлантическая – поднята на 68 м

Наличие различных уровней можно объяснить только аномалиями гравитационного поля Земли, причины которых пока не ясны. Есть предположение, что причиной является слоистая структура планеты. Плотность слоев, как было показано ранее, минимальна на поверхности и возрастает к центру. Поверхность геосфер далека от сферической формы, кроме того, причинами гравитационных аномалий могут быть области перехода вещества из твердого состояния в жидкое и наоборот. Последние обстоятельства делают возможным отклонение направления силы тяжести от радиального.

Любопытный Бенджамин Франклин, путешествуя в середине XVIII века на судне, обратил внимание, что в светильнике, висящем под подволоком его каюты, во время качки судна поверхность осветительного масла остается в спокойном состоянии, в то время как находящийся под ним слой воды находится в состоянии волнового движения. Это было первое наблюдение подводных волн. Оказалось, что под водной поверхностью океана могут возникать участки интенсивного волнового движения с амплитудой волн до 100 м. На поверхности таких волн не наблюдается даже при цунами.

Океан обладает значительными энергетическими и сырьевыми ресурсами. В донных отложениях и толще океанских вод имеются огромные запасы полезных ископаемых. В водах океана в больших количествах содержатся практически все известные в настоящее время человеку химические элементы. В растворенном виде в океанской воде присутствует 4 млрд. т урана, 300 млн. т серебра, 4 млн. т золота. Учитывая массу океанических вод, можно легко представить, что концентрации этих элементов таковы, что в настоящее время их добыча не представляется экономически целесообразной.

Оправданна в наши дни добыча из океанской воды магния и брома. В частности, брома из океанов и морей добывается около 75% от общего объема потребления этого вещества. Следует упомянуть в этой связи, что экономически оправданна добыча йода из водорослей, который они накапливают в процессе своей жизнедеятельности. Листья ламинарии (морской капусты) в сушеном виде издавна используются для покрытия йододефицита, необходимого для нормального функционирования щитовидной железы.

В прибрежных мелководных зонах некоторыми странами налажена добыча известняка и ракушечника, представляющих собой прекрасный строительный материал. Так, например, Америка таким способом получает ежегодно около 20 млн. т устричных раковин, которые, будучи измельченными, используются в качестве добавок при изготовлении различного рода строительных конструкций.

На дне океанов, особенно Тихого, находятся металлические конкреции, представляющие собой различные металлы, выделившиеся из воды на небольших твердых телах за длительный промежуток времени. Обнаруживаются конкреции, возникшие на мелкой гальке, акульих зубах и т. п. На на каждом квадратном километре дна Тихого океана находится $1,24 \cdot 10^5$ т конкреций. В тихоокеанских конкрециях содержится 1% никеля, 0,5% меди и 0,5% кобальта.

Мировой океан, наряду с прочим, является источником высококачественной естественной экологически чистой пищи. Для успешной ее добычи потребовались исследования распределения и перемещения питательных веществ отдельных привлекательных в качестве сырья гидробионтов. Как отмечалось ранее, в настоящее время из океанов добывается около 55 млн. т гидробионтов при потенциальной возможности добычи – 200 млн. т, при этом не нарушаются естественные экологические балансы. На рис. 7.14 показано распределение живых организмов по глубине.

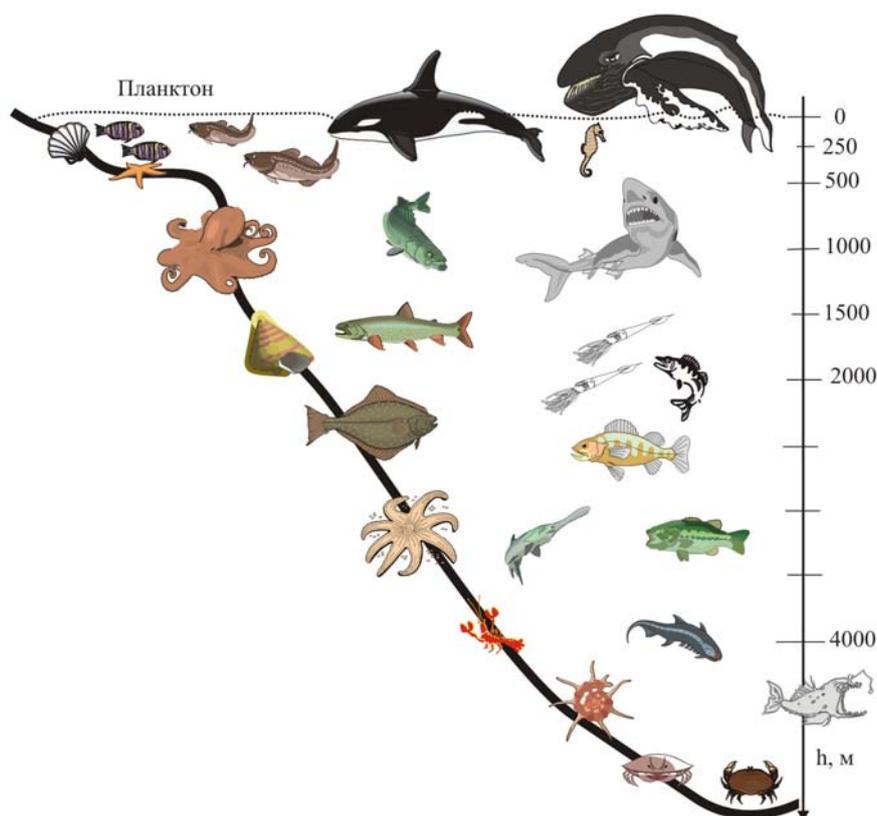


Рис. 7.14. Живые организмы в океане

Жизнь в океане более разнообразна, чем на суше – там обитает более 200 000 видов организмов. Некоторые из них, например кистеперая рыба целакант, представляют собой живые ископаемые, предки которых появились в водах океана более 300 млн. лет назад. Большая часть из всего многообразия морских организмов встречается в относительно мелководных районах океана, куда в изобилии проникает излучение Солнца, способствующее процессам фотосинтеза. Водная жизнь наилучшим образом развивается в районах, богатых кислородом, что обуславливает обилие питательных веществ.

Технологии, используемые при освоении биологических ресурсов океана, так же как и все прочие, далеки от совершенства и рациональности. Примером может служить ситуация с рыбной мукой. Человек уже несколько тысяч лет добывает морепродукты, а получать в промышленных объемах рыбную муку стали только в последние 50–70 лет.

Обнаружено, что к поверхности океана поднимаются глубинные воды, обогащенные питательными веществами, что обеспечивает устойчивое состояние много-

численных пищевых цепочек как для простейших одноклеточных организмов, так и для млекопитающих, превосходящих по массе и размерам все сухопутные живые организмы. Речь идет о китах, касатках и дельфинах.

В океане трудно отыскать живой организм, который бы кого-нибудь не ел. Как правило, более крупные поедают тех, кто помельче, хотя имеют место и исключения. Организмы, входящие в состав зоопланктона, используют в пищу растения, которые, в свою очередь, являются пищевым продуктом для более крупных водных обитателей, обитающих на большей глубине. В океане ничего не пропадает зря. Например, для стеклянных губок питанием служат останки отживших свой короткий век существ – органического детрита, погружающегося на глубины и дно из тех слоев, что расположены выше. Пищевой механизм океана, с его многообразными цепями, имеет очень тонкое, динамически настроенное равновесие, законы которого человеком еще не до конца изучены.

Нарушение численности любого вида растений или животных вследствие жестких пищевых связей неминуемо приведет к изменениям в численном и видовом составе всех остальных обитателей водного мира. Океан огромен и сбалансирован по всем параметрам, но вмешательство в его динамику человека, не до конца осознающего последствия своих действий, может вызвать необратимые негативные процессы планетарного масштаба. Тому есть многочисленные примеры.

На протяжении жизни двух поколений (не более 60 лет) в одном из самых биопродуктивных районов Мирового океана – в Охотском море подорваны биопопуляции более десяти видов гидробионтов, в частности камчатского краба, минтая, сельди, кальмара, белокорого и синекорого палтуса, трески, морского окуня и т. д.

Мало того, что человек в настоящее время изымает биологического сырья больше, чем океан может воспроизводить, так в последнее время за счет океана цивилизация начала решать свои энергетические проблемы.

В последние десятилетия нефть начали добывать в шельфовых зонах. К чему это приводит, можно наглядно проследить на примере Сахалинского шельфа, где большие по площади районы в окрестностях буровых платформ превращены в биологически мертвые зоны. В настоящее время аналогичный процесс разворачивается у берегов Камчатки. В ближайшее время в Охотском море начнутся пробные бурения. Природа распорядилась так, что нефтеносные районы Охотского моря совпадают с экваториями, наиболее насыщенными промысловыми видами морских обитателей.

Несанкционированные незначительные выбросы нефтепродуктов с рыболовных судов, которыми так были озабочены представители экологических служб, покажутся видами Палестины в волшебном фонаре по сравнению с загрязнениями, вызванными добычей нефти. Добывать, разливать и транспортировать сырую нефть без аварийных разливов невозможно даже теоретически.

Вода. Из всех жидкостей, окружающих человека, вода является самой необходимой для жизнедеятельности нашего организма. Зарождение жизни на Земле и ее развитие так или иначе связано с водой. Другими словами, эта особая жидкость с достаточно простой на первый взгляд (но только на первый) химической формулой H_2O сопровождает жизнь человека от рождения и до самой его физической смерти.

Несмотря на то что вода является основным «строительным материалом» на Земле, до недавнего времени люди имели о ней самые примитивные представления. Правда, и в наше, якобы просвещенное время, нельзя указать на человека, для которого вода перестала быть объектом без тайн и интриги.

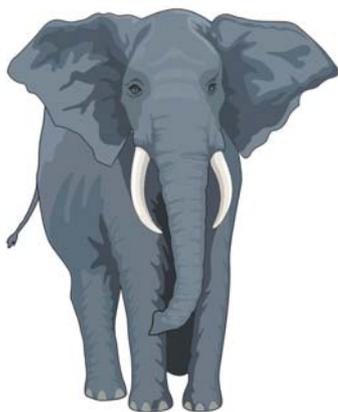


Рис. 7.15. Притча о слоне

На уроках физики при объяснении всей сложности характеристик воды принято рассказывать детям такую забавную притчу о слоне. Шестеро абсолютно незрячих людей решили на ощупь составить представление об этом своеобразном животном (рис. 7.15). Первый ощупал бок слона и пришел к заключению, что слон – это неровная шершавая стена. Второй слепец исследовал ногу слона и решил, что слон – это столб. Третий из участников эксперимента погладил ухо слона и был уверен, что слон – это большой веер. Четвертый наткнулся на бивень, после чего пребывал в полной уверенности, что слон – это копые. Пятому для исследования достался хвост, что стало основанием отождествить слона с веревкой.

Последний из слепцов своими ладонями исследовал хобот и пришел однозначному выводу, что слон – это змея. А на самом деле это был обыкновенный слон.

Вместе с тем вода, как полагают ученые, появилась еще на стадии уплотнения вследствие вихревого движения пылегазового облака. Предполагают, что вода присутствовала в виде ледяной мелкодисперсной пыли. Исследования космоса подтвердили, что кислород и водород входят в первую шестерку самых распространенных во Вселенной веществ.

Молекулы воды обнаружены за пределами Солнечной системы. В созвездиях Кассиопеи и Ориона радиофизическими методами астрономы обнаружили огромные облака, состоящие из молекул воды. Размеры этих облаков более чем в 40 раз превышают расстояние от Земли до Солнца. Космические «пришельцы», падающие на поверхность Земли, довольно часто представляют собой огромные ледяные конгломераты смерзшейся воды, метана и минеральных частиц.

В настоящее время укоренились шесть основных гипотез о происхождении воды, каждая из них, имея несомненное рациональное зерно, тем не менее, подобно притче о слоне, имеет ограниченное применение, проливая свет на некоторые частности. Ученые не имеют в своем распоряжении универсальной теории происхождения воды, которая бы поставила точку в давнем споре приверженцев различных концепций.

Гипотезы о происхождении этой странной и самой загадочной жидкости на планете так или иначе связаны с теориями происхождения самой Земли, которые насколько разнообразны, настолько и недостаточно аргументированы.

Первая гипотеза происхождения воды основана на теории «горячего» происхождения Земли, в соответствии с которой Земля в ранние периоды своего существования представляла собой раскаленный шар, который, согласно термодинамическим законам, уменьшал свою температуру за счет излучения тепла в окружающее пространство. На определенной стадии охлаждения возникла так называемая первородная кора, в которой наряду с другими химическими элементами появились комбинации кислорода и водорода, среди которых была и вода.

Через трещины земной коры перегретый пар вырывался наружу, образуя начальное поколение атмосферы в виде облачного покрова. При достижении критической температуры пары воды конденсировались и выпадали на поверхность в виде обильных дождей. По мнению сторонников этой гипотезы, именно ранние земные дожди стали источником постоянного накопления жидкости на ее поверхности. Таким образом образовался Мировой океан.

Вторая гипотеза основана на теории «холодного» происхождения Земли, о

которой говорилось выше. Вихревое движение пылегазового облака и гравитационное уплотнение вещества, сопровождающееся нагревом, вызвали интенсивную вулканическую деятельность с выбросами большого количества паров, при конденсации которых образовалось большое количество воды. Вода, таким образом, содержалась в первичном облаке, из которого конструировалась наша планета. В пользу этой схемы появления воды говорит факт ее присутствия в космических объектах, «небесных камнях» в объемной концентрации до 0,5%. При массе Земли $M_3 \cong 6 \cdot 10^{24}$ кг она должна содержать $3 \cdot 10^{21}$ кг воды. А ее в современных масштабах планеты более чем в 200 раз меньше, т. е. всего около $1,5 \cdot 10^{19}$ кг. Если принять обсуждаемую теорию, то огромное количество недостающей воды должно находиться под земной поверхностью.

Третья гипотеза предполагает, что на стадии разогрева планеты на глубинах 50–70 км из ионов водорода и кислорода в условиях высоких температур и давлений возник водяной пар, который просачивался через верхние слои мантии в земную кору. Перемещение пара по толщине коры при меньших температурах способствовало протеканию химических реакций, т. е. минерализации воды. Горячая вода растворяла кислоты и щелочи, превращаясь в рассол. Если принять эту гипотезу, то на глубине 15–20 км над поверхностью гранитного пояса должен присутствовать слой рассола. Сторонники этой теории напоминают об имеющем место экспериментальном факте скачкообразного изменения скорости звука с глубиной, что говорит о возможности присутствия жидкого слоя. На мельничное колесо этой теории льет воду и обнаруженный дрейф материков, «плывущих» в этой глубокой прослойке воды, которая в данном случае исполняет роль смазки.

Четвёртая гипотеза. В 1972 г. английский астроном Хойл, на основе анализа данных космических исследований выдвинул гипотезу, основанную на особенностях происхождения Солнечной системы. Конденсация протопланетного облака происходила таким образом, что на разных расстояниях от Солнца установился градиент температуры. В окрестностях центра системы температуры были такими, что конденсировались тугоплавкие вещества. В периферийных областях температура была относительно низкой, порядка 350 К, что достаточно для конденсации паров воды. Предполагается именно этим объяснять «ледяную природу» периферийных планет-гигантов – Урана, Нептуна и Плутона. Причем при формировании планет-гигантов наблюдалось гравитационное выталкивание ледяных глыб в область внутренних планет, которые, не успев расплавиться под действием солнечных лучей, попадали на поверхность Земли и других планет. «Ледяные дожди» были более интенсивными на Марсе и более скудными на Венере. Приведенные Хойлом выкладки не исключают образование океанов и морей на Земле как следствие «ледяных дождей» в течение нескольких миллионов лет.

Пятая гипотеза предполагает, что вода в верхних слоях атмосферы образовалась при бомбардировке ее космическими частицами, среди которых присутствуют в немалых количествах протоны, т. е. ионизированные атомы водорода. Ядра водорода при движении в атмосфере захватывают электроны, превращаясь в атомарный водород, которые по известной схеме вступают в реакцию с атомами кислорода. Оценочные расчеты показали, что этот источник мог дать около 1,5 т воды в год. По планетарным меркам, эта масса не представляется существенной, однако если процесс рассматривать в течение 5–7 млрд. лет, то количество этих постоянных поступлений воды соизмеримо с общими ее запасами на планете.

Шестая гипотеза возникла совсем недавно. Основанием к тому было появление уточненных данных о постоянном расширении Земли со скоростью примерно 1 см в год. Причем, например, Москва и Санкт-Петербург удаляются от непод-

вижного Гамбурга, находящегося в центре Европы, на восток. Судя по этой совсем небольшой по абсолютной величине скорости расширения, 300 млн. лет назад радиус Земли был практически в два раза меньше теперешнего. Долгое время причины расширения были не вполне ясны. Оказалось, все дело в самом распространенном химическом элементе во Вселенной – водороде. Земля, так же как и вся известная человеку Вселенная, на 98% состоит из водорода, который, наряду с металлами, был в составе протооблака, послужившего «строительным материалом» для Солнца, Земли и всех остальных планет.

Как установили ученые, водород в больших количествах может поглощаться металлами, при этом их объем уменьшается. Вот такое не совсем понятное без специальной подготовки свойство. В лабораторных условиях было получено, что при атмосферном давлении щелочные металлы при поглощении водорода способны сократить свой объем более чем в 1,5 раза, а вот железо и никель уменьшали свой объем не так заметно.

При гравитационном сжатии протооблака давление и температура в его недрах росли, что создавало более благоприятные условия для растворения водорода. В некоторый момент времени концентрация водорода в металлах стала критической, поглощение прекратилось, а температура и давление продолжали увеличиваться. Начался обратный процесс – выделение водорода из металлов. Разрушение металловодородных соединений, т. е. дегазация водорода сопровождалась значительным увеличением объема металлического ядра, при этом земная кора претерпела многочисленные разрушения. Попадая из ядра в менее заглубленные слои Земли, водород захватывал атомы кислорода, что и привело к возникновению молекул воды в виде пара. Конденсация паров в конечном счете привела к заполнению разломов земной коры. Возникли океаны.

Все приведенные выше гипотезы имеют право на жизнь, потому что в их основе лежат вполне вероятные физические и химические процессы, не противоречащие известным человечеству законам. Говорить же о приоритете какой-нибудь из них над остальными, оснований практически нет. Что касается вопроса о происхождении воды, то здесь так же, как и в притче о слоне, все только начинается. Формулировка единой теории возникновения земной воды, наверное, может появиться только в том случае, если информации об этой таинственной жидкости станет достаточно для выяснения всех ее физических, химических и иных индивидуальных свойств.

Что же известно в наше время о воде, кроме того, что гидросфера – океаны, моря, реки, озера, болота и атмосферная влага содержат в общей сложности $1,4 \cdot 10^{19}$ т воды? Три четверти поверхности Земли покрыто водой. Космические снимки Земли показывают, что она выглядит как сплошная вода с незначительными по площади вкраплениями материков.

До XIX века ученые не предполагали, что вода представляет собой химическое соединение. Воду считали химическим элементом, таким как мель, натрий или аргон. Только в 1805 г. немецкий естествоиспытатель Александр Гумбольдт (1769–1859 гг.) и французский физик Жозеф Луи Гей-Люссак (1778–1850 гг.) установили, что вода состоит из молекул, каждая из которых содержит два атома водорода и один кислорода.

Более ста лет после этого исследователи и инженеры считали, что единственно возможным стабильным химическим образованием является жидкость с химической формулой H_2O . В 1932 г. выяснилось, что в качестве атомарного водорода в состав молекулы воды может входить изотоп – дейтерий. Такой воде дали название – тяжелая вода.

Молекулярный вес тяжелой воды оказался на две единицы больше, другими словами, жидкость имела молярный вес не $18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а $20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Ядро Земли, в соответствии с этой моделью, состоит из гидридов металлов, включая и карбид железа. Зоны с высокими значениями давления и температур выделяют среди прочих веществ водород и углеводороды, которые, поднимаясь к поверхности, взаимодействуют с окисленными породами, образуя углекислый газ и пары воды, выбрасываемые в атмосферу через жерла вулканов и разломы земной коры.

По данным академика Н.П. Семеновича за геологическую историю существования Земли на поверхность было выброшено около $3,4 \cdot 10^9$ км³ воды. Примерно треть общего количества воды испарилась с поверхности в атмосферу, где произошла фотодиссоциация молекул на водород и кислород. Оставшаяся на поверхности вода образовала гидросферу, а испарившаяся – атмосферу. Помимо паров воды и углерода на поверхность из области внутренних слоев выделялись соединения фосфора, серы, кислорода и азота. Гидросфера, таким образом, представляла собой водную основу, насыщенную различными веществами, составившими впоследствии основу первых неорганических соединений, из которых возникла жизнь.

По мнению академика И.А. Опарина, «именно вода гидросферы явилась той обязательной, незаменимой средой, в которой происходило формирование наиболее сложных органических соединений, послуживших в дальнейшем материалом для построения тел живых существ. Вода и сейчас является наипростейшим, но количественно преобладающим химическим компонентом «живой материи» – всей совокупности организмов, населяющих нашу планету».

Чтобы подсчитать количество воды на планете, ученые объявили десятилетнюю гидрологическую научную программу, результатом которой стал развернутый отчет «Мировые водные ресурсы и водный баланс земного шара». Проведенные исследования и оценки подтвердили, что гидросфера (океаны, моря, озера, реки, болота, атмосфера) содержит в общей сложности $1,385 \cdot 10^9$ км³ воды, которая покрывает три четверти всей площади планеты.

Подтвердилось также, что объем доступной пресной воды в общей массе невелик – всего около 2,25% от общего объема гидросферы. Вода океанов и морей ($\cong 97,75\%$), которую в естественном виде употреблять для питья и сельскохозяйственных технологий нельзя, даже в технических конструкциях имеет ограниченное применение.

Половина общего количества пресных вод ($\cong 24 \cdot 10^6$ км³) присутствует на Земле в виде ледяного покрова Антарктиды, Арктики, Гренландии и ледяных и снежных шапок горных вершин. В земной коре скрыто $23,4 \cdot 10^6$ км³ воды. Таким образом, объем сравнительно доступной пресной воды исчисляется не миллионами, а тысячами кубических километров.

Более всего пресной воды находится в объемах озер ($\cong 1,76 \cdot 10^5$ км³), на втором месте находятся запасы воды в болотах – $1,03 \cdot 10^4$ км³, в реках сосредоточено около $2,12 \cdot 10^3$ км³. Остальная пресная вода находится в атмосфере.

Вода, как самый распространенный вид природного сырья не стала исключением в общей стратегии природопользования. Действительно, воды на Земле, если смотреть с поверхности Луны, много, а если начало системы отсчета переместить на Землю, то впечатление поменяется. Но об этом немного позже. Далее же покажем, что вода – самое странное и удивительное вещество на нашей планете.

Как написано в популярной химической энциклопедии, вода является простейшим соединением водорода с кислородом. После открытия дейтерия выяснилось, что тяжелая вода встречается в малых количествах в природе, причем по внешнему виду она не

отличается от обычной воды. Формула тяжелой воды также проста – D_2O , правда, она на 10% плотнее обычной воды и имеет вязкость, при прочих равных условиях, в среднем на 23% выше. В твердое состояние тяжелая вода переходит при температуре $3,8^\circ C$. Тяжелая вода испаряется с поверхности менее интенсивно, но более активно конденсируется, что объясняет более частое присутствие ее в районах с жарким климатом.

В природе тяжелая вода D_2O находится в очень незначительных концентрациях, составляющих миллионные доли процента, что, собственно, и обусловило ее столь позднее обнаружение. Более распространена так называемая полутяжелая вода, имеющая химическую формулу HDO (с атомом кислорода соединены по одному атому водорода и дейтерия). В Мировом океане находится около 1000 т полутяжелой воды.

Интерес к тяжелой воде возник при разработке атомных технологий управляемой ядерной реакции. Оказалось, что тяжелая вода является эффективным замедлителем быстрых нейтронов. Тяжелая вода, в случае ее участия в термоядерном процессе, может выделять огромное количество энергии. Одна единица массы тяжелой воды в 10 миллионов раз энергетически эффективнее эквивалентного количества каменного угля.

Биологи совместно с медиками выяснили, что тяжелая вода оказывает негативное влияние на живые организмы, включая растения. При экспериментах с животными было установлено, что употребление тяжелой воды приводит в конечном счете к разложению почек. Снижение присутствия тяжелой воды на 25% ниже природного количества в экспериментах с мышами, крысами, морскими свинками и свиньями приводило к устойчивому повышению рождаемости. Куры в два раза больше приносили яиц. Отмечено также сокращение сроков созревания пшеницы и увеличение ее урожайности. Отделять тяжелую воду от обычной в настоящее время достаточно дорого. В этом процессе используются достаточно сложные физико-химические технологии.

Вслед за тяжелой водой – дейтерием – учеными была обнаружена еще одна модификация воды – сверхтяжелая вода, молекула которой состоит из атома кислорода и двух атомов трития. Химическая формула сверхтяжелой воды – T_2O . Тритий является продуктом ядерных реакций, протекающих в верхних слоях атмосферы Земли. Тритий возникает при бомбардировке атомов азота нейтронами, прилетающими из космического пространства. В минуту на каждый квадратный сантиметр земной поверхности попадает 8–10 атомов трития. По пути к поверхности, атомы трития, взаимодействуя с кислородом, образуют воду с химической формулой T_2O .

Сверхтяжелая вода вскипает при нормальном давлении при температуре $104^\circ C$, а переходит в твердое состояние при температуре от $+4$ до $+9^\circ C$, плотность T_2O составляет $1,33 \cdot 10^3$ кг/м³. Так же как и тяжелая вода D_2O , сверхтяжелая вода T_2O применяется в ядерной и атомной энергетике.

В лабораторных условиях получено несколько более тяжелых радиоактивных изотопов водорода $\{H^4, H^5\}$. Ученые считают, что возможны молекулы воды с любым из пяти известных изотопов водорода. Кроме изотопов водорода еще существуют изотопы кислорода, помимо O^{16} в природном состоянии обнаруживается кислород $\{O^{17}, O^{18}\}$, принципиальных невозможностей участия изотопов кислорода в образовании молекул воды не существует. Кроме природных изотопов кислорода в лабораторных условиях получены короткоживущие и радиоактивные атомы $\{O^{13}, O^{14}, O^{15}, O^{19}, O^{20}, O^{24}\}$. Пять водородных и девять кислородных изотопов могут обеспечивать 135 различных структур молекул воды.

Следует отметить, что абсолютно чистой, так называемой протиевой воды

$^1\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$ в природе не существует. Такую воду, без примеси других модификаций, удается получать только в лабораторных условиях путем сложной системы физической и химической очистки или путем прямого синтеза из молекул водорода и кислорода.

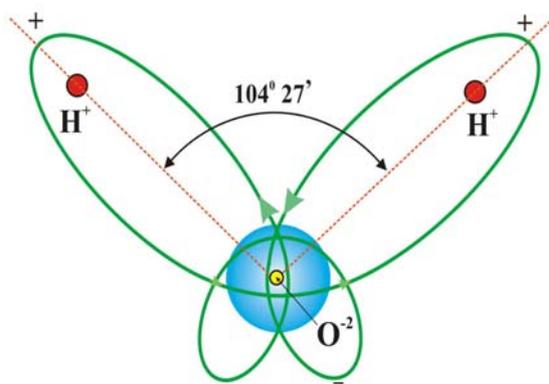


Рис. 7.16. Электронные орбитали молекулы воды

Если представить геометрический образ молекулы воды, то ядра двух атомов водорода и кислорода образуют равнобедренный треугольник с ядром кислорода в вершине. Модель молекулы воды, изображенную на рис. 7.16, предложил датский физик Нильс Бор (1885–1962 гг.). Молекула, в соответствии с теорией электронного строения вещества, располагает пятью электронными парами, которые образуют неоднородное электронное облако с избытком концентрации в области расположения ядра кислорода. Внутренняя электронная пара кислорода равномерно окружает ядро, Бор изобразил ее в виде окружности. Четыре внешних электрона группируются в две электронные пары, которые частично не скомпенсированы. Суммарные орбитали этих пар схематично изображены в виде эллипсов, вытянутых от общего центра, в котором расположено ядро водорода. Каждый из оставшихся двух электронов кислорода образует пару с одним электроном водорода. В области расположения ядер водорода плотность электронного облака ослаблена

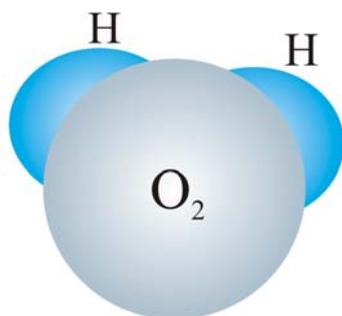


Рис. 7.17. Схема электронного облака молекулы

Как можно видеть из схемы Бора, в молекуле воды имеются четыре полюса зарядов. Общий вид электронного облака изолированной молекулы воды приведен на рис. 7.17. Образно говоря, молекула воды представляет собой сферу с двумя выпуклостями. Молекула воды обладает ярко выраженной полярностью с относительно высоким дипольным моментом – 1,87 Дебая.

Вода обладает уникальной удельной теплоемкостью – $c \cong 4182$ Дж/(кг·К), что объясняет ее широкое применение в инженерных конструкциях, где надо подводить или отводить тепло.

Диэлектрическая проницаемость $\epsilon \cong 80$ (речь идет о дистиллированной воде), большей проницаемостью обладают только керамика ($\epsilon \cong 100$) и титанат бария ($\epsilon \cong 1200$). Магнитная проницаемость воды, которая по отношению к магнитным полям является диамагнетиком, равна $(1 - \mu) \cdot 10^6 \cong 9,0$.

Удивительные электрические и магнитные свойства воды, во многом еще неизвестные, обеспечили широкое распространение микроволновых печей, в которых все продукты, содержащие воду, способны разогреваться при облучении их волнами микроволнового диапазона.

Очищенная дистиллированная вода является диэлектрической жидкостью, но постоянное присутствие в ней других веществ, в частности кислот и щелочей, делает ее электропроводной. Высокая диэлектрическая проницаемость воды делает ее отличным универсальным растворителем твердых тел, газов и других жидкостей.

В пресной воде солей содержится обычно до 1 г/л. В морской воде солей содержится до нескольких граммов на литр. В Балтийском море – 5 г/л, в Черном – 18 г/л, в Красном море – 40 г/л. В среднем в одном литре воды Мирового океана содержится 34–35 г различных солей.

Практически в любой воде присутствуют газы – как в свободном состоянии, так и в растворенном виде. Система газ – вода изучена в настоящее время недостаточно, несмотря на то что газосодержание воды определяет ее многие технические и технологические характеристики. Процесс перехода воды из жидкого состояния в твердое широко распространен. Образование из воды льда и снега, которыми пользуется человек с незапамятных времен, происходит в природе, этот процесс используется в технике и технологиях. Существенная часть площади земного шара периодически покрывается снегом, а в ряде регионов, например в Арктике, Антарктике, Гренландии и в горах, снег и лед наблюдаются в течение всего года. Россия в этом плане, являясь самой холодной страной, особенно хорошо знакома с этим фазовым состоянием воды.

Процесс образования льда, как и все, что связано с водой, имеет ряд интересных особенностей. Уравнение Клапейрона – Менделеева

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

записанное для идеального газа, в более сложной форме справедливо и для жидкостей. Из него, в частности, следует, что понижение температуры при постоянном давлении должно сопровождаться уменьшением объема. Так происходит для подавляющего большинства газообразных, жидких и твердых тел, кроме висмута и галлия. Вода же проявляет обратное свойство. Всем известно, что если бутылку с водой положить в морозильную камеру, то при замерзании воды она лопнет.

На рис. 7.18 показана зависимость относительного объема воды от температуры в окрестностях точки замерзания.

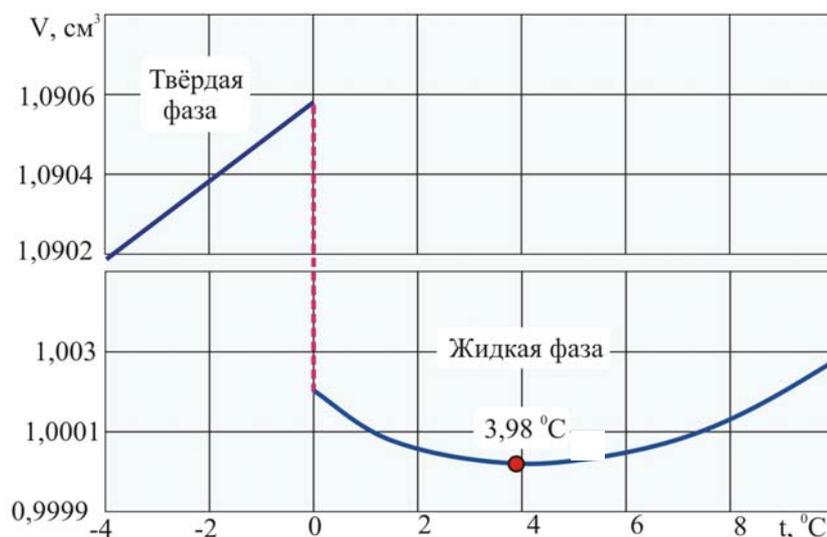


Рис. 7.18. Относительный объем воды в функции температуры

7.3. Водные заботы человечества

Еще одной «болезнью роста» человечества в постиндустриальную эпоху стали экологические и экономические трудности, связанные с состоянием гидросферы, и особенно стремительно истощающихся запасов пресной воды.

Поверхностные воды планеты сосредоточены в основном в Мировом океане. Около 91% всей водной массы сосредоточено в океане, общая акватория которого составляет $3,61 \cdot 10^8$ км², что примерно в 2,4 раза больше поверхности суши. Если весь имеющийся в Мировом океане объем воды распределить по всей поверхности Земли равномерно, то он покроет ее слоем высотой 3 000 м. Большая часть земных запасов воды соленая (97,5%), причем из 2,5% общих ресурсов пресной воды только 0,36% расположено в местах, удобных для ее добычи (рис. 7.19). Большая часть пресной воды находится на планете в виде снега и льда. Около 4% пресной воды находится в подземных резервуарах.

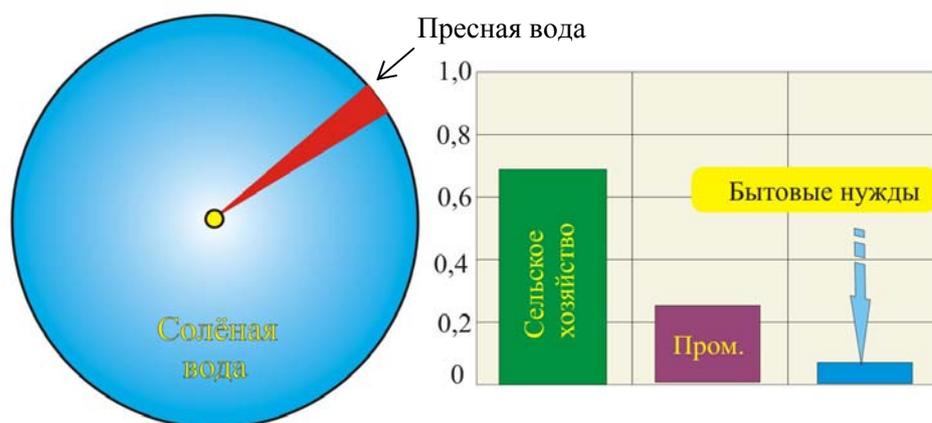


Рис. 7.19. Запасы воды на Земле

В настоящее время человечество на свои нужды ежегодно использует $3,8 \cdot 10^9$ м³ пресной воды. При современном уровне потребления запасов пресной воды из традиционных источников должно хватить, по прогнозам ученых, на ближайшие 30 лет. Сельскохозяйственное производство расходует на свои нужды в год 69% всей пресной воды, промышленное производство – 23%, на бытовые нужды – 6%.

В мире, как и в России, потребление воды на одного человека колеблется в довольно широких пределах. Среднее потребление по отдельным регионам колеблется от 125 до 350 литров в сутки, в Санкт Петербурге – 450 литров, в Москве – 400 литров, в Париже – 500 литров, в Нью-Йорке – более 1000 литров.

По данным ООН, на 60% суши, где проживают люди, уже теперь имеется дефицит пресной воды, удовлетворяющей санитарным нормам. Четвертая часть населения Земли вынуждена потреблять для своих нужд опасную пресную воду.

Самыми большими водными ресурсами на одного человека, исключая Россию, обладают следующие страны: Французская Гвиана – $8,1 \cdot 10^5$ м³; Исландия – $6,1 \cdot 10^5$ м³; Гвиана – $3,2 \cdot 10^5$ м³; Суринам – $2,9 \cdot 10^5$ м³; Конго – $2,75 \cdot 10^5$ м³; Папуа – Новая Гвинея – $1,66 \cdot 10^5$ м³; Габон – $1,33 \cdot 10^5$ м³; Соломоновы Острова – $1,0 \cdot 10^5$ м³; Канада – $9 \cdot 10^4$ м³; Новая Зеландия – $8,6 \cdot 10^4$ м³.

Список 10 стран, имеющих самые маленькие запасы воды в расчете на одного жителя, имеет следующий вид: Мальта – 129 м³; Саудовская Аравия – 118 м³; Ливия – 113 м³; Мальдивская Республика – 103 м³; Катар – 94 м³; Содружество Багамских Островов – 66 м³; Объединенные Арабские Эмираты – 58 м³; Сектор Газы – 52 м³; Кувейт – 10 м³.

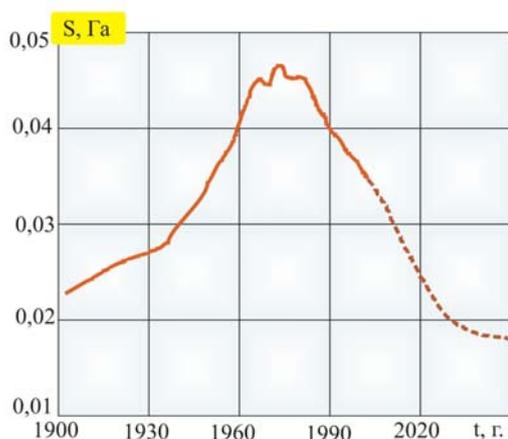


Рис. 7.20. Изменение мировой площади орошаемых земель

Подтверждением неблагоприятной ситуации с пресной водой на нашей планете могут служить данные рис. 7.20, на котором показано изменение орошаемых площадей в пересчете на одного жителя Земли. Максимальные размеры поливных площадей, имели место в 60-х годах, пик приходился на 1978 год ($S \approx 0,047$ Га/чел), потом они стали сокращаться из-за дефицита пресной воды.

Орошаемое земледелие сконцентрировано в азиатской части планеты, где господствует теплый климат и текут такие реки, как Инд, Ганг, Янцзы, Хуанхэ, Брахмапутра. Руслу этих рек весьма удобны для строительства плотин. В Китае, например, на орошаемых землях собирается около 70% зерновых культур, в Индии 50%, в США – 15%.

В Китае за 1991–1996 гг. **уровень грунтовых вод под Северо-Китайской равниной опустился в среднем на 1,5 м**, а эта «плантация» дает Поднебесной примерно 40% урожая зерновых и овощных культур. Симптом, надо прямо сказать, не из приятных.

Администрация ООН создала специальную группу, в которую вошли более тысячи ученых и специалистов, причастных к водопользованию и геоэкологическому прогнозированию. В задачи группы входила оценка настоящей ситуации и прогноз динамики запасов пресной воды на планете.

Согласно распространенным в прошлом году в Лондоне данным доклада, к 2032 г. в результате непродуманной хозяйственной деятельности человека существенный урон будет нанесен 70% суши Земли. Больше всего пострадают Южная Америка и Карибский регион – более 80% их территории. Через 30 лет более половины населения Земли будет страдать от нехватки воды, а 2,5% обитателей планеты будут голодать. Это станет результатом разрушительного воздействия, которое оказывает непродуманная деятельность человека на состояние мировой экосистемы.

В последнее время в научной и околонучной прессе, а также в СМИ, много разговоров ведется о глобальном потеплении и его причинах. Несмотря на то что полной ясности в вопросе о причинах и степени потепления еще нет, это явление планетарного масштаба окажет влияние и на водный баланс Земли.

Горные снега и ледники являются главным источником пресной воды примерно для 1,6 млрд. жителей нашей планеты. По прогнозам некоторых ученых, через примерно 50 лет глобальное потепление может частично их уничтожить, и миллионам людей придется искать другие источники пресной воды. Такие неутешительные прогнозы обнародовала группа американских ученых, занимающихся математическим моделированием геоэкологических процессов.

Ученые моделировали влияние уменьшения объема снеговых шапок на реку Рейн в Европе, канадские прерии и западную часть США. Результаты говорят о множестве последствий – от сокращения грузового судоходства по Рейну до уязвимости сельского хозяйства перед засухами. Предметом исследования стали также ледники Гималаев и Гиндукуша. Эти горы по количеству льда занимают третье в мире место после Антарктики и Гренландии. Реки, которые они питают, обеспечивают в общей сложности водой не менее 50% населения Земли. Однако недавнее исследование, проведенное в Китае, показывает, что на протяжении 25 лет площадь ледников уменьшается.

Моделирование, в частности, показало, что к 2050 г. водные потоки в восточной части экваториальной Африки, бассейне Ла Плата в Южной Америке и в полярных регионах Северной Америки и Евразии увеличатся на 10–40%, что связано с интенсивным таянием ледников. В Северной Африке, Южной Европе, западной части Северной Америки и на Ближнем Востоке ожидается спад уровня рек на 10–30%.

Несмотря на весьма неравномерное распределение потребления воды между жителями отдельных регионов и государств, вода в чистом ее виде требуется всем. Тело человека в среднем на две трети состоит из воды, причем такая пропорция наблюдается от эмбрионального состояния до физического окончания жизненного цикла. Причем отклонения имеют место только в большую сторону. Так, например, организм трехмесячного плода состоит из воды и ее соединений на 95%, у пятимесячного – на 85%, у новорожденного – 70% и у взрослого человека – не менее 65%.

Мозг человека состоит из воды на 83%, соединительные ткани – на 80%, почки – 82%, кожа – 72%, кровь – 72%, жировая ткань – 29%, скелет – 22%, зубная эмаль – 0,2%. По одной из популярных версий ученых, старение организма связано с нарушением способности коллоидов, особенно белковых соединений, связывать воду. Вода, благодаря ее уникальным физическим и химическим свойствам, является неперменной средой, где протекают многочисленные химические реакции, обеспечивающие выполнение организмом своих жизненных функций. Вода является неперменным участником всех биохимических процессов, протекающих в живых организмах любого уровня сложности, включая человека. Можно сказать, что в живых организмах на основе воды происходит обмен веществ.

Организм взрослого человека при умеренных физических нагрузках ежедневно при опрвлении своих физиологических потребностей выделяет около 2,5 кг воды. экстремальных условиях при высоком уровне физических нагрузок или повышенной температуре окружающей среды выделение воды может достигать в сутки 10 кг. Все органы человеческого организма могут выполнять свои функции, в штатном режиме, если потребление воды составляет 120–150 г на один килограмм массы тела. Баланс потребляемой организмом воды складывается из 1 кг жидкой пищи, 0,5–0,7 кг питьевой воды, 0,7 кг воды, содержащейся в твердых продуктах, 0,3 кг воды, вырабатываемой самим организмом. В организме вода синтезируется в результате реакций окисления различных веществ. При окислении, например, 0,1 кг жиров образуется 10,7 граммов воды. Этой способностью организма успешно пользуются верблюды, которые, путешествуя по безводной пустыне, подпитывают свой организм водой, получаемой при окислении собственных жировых запасов.

В этой связи людям с избыточным весом рекомендуется потреблять меньшее количество воды, чтобы провоцировать организм на интенсификацию переработки жировых накоплений. Потеря организмом в короткий промежуток времени 1–1,5 литра воды требует немедленного пополнения, обезвоживание организма на 6%

его массы вызывает негативную реакцию: повышается температура, чаще начинает биться сердце, увеличивается вязкость крови и т. д.

Из приведенных выше кратких сведений следует, что вода является прямым условием безопасности жизнедеятельности как отдельного человека, так и сообщества в целом. Однако в настоящее время человечество заботят совершенно другие проблемы. Достаточно посмотреть информационные выпуски новостей и аналитические программы, чтобы понять, что основное внимание уделяется состоянию мировых валютных рынков и ценам за баррель нефти. Это главные темы. Тема пресной воды мелькает время от времени среди прочих, в разряде второстепенного.

Ученые вполне обоснованно считают, что сокращение мировых запасов пресной воды в ближайшее время даст о себе знать в планетарном масштабе. Одной из основных причин возможного «водного кризиса» является постоянное увеличение ее потребления. Ожидается, что увеличение в ближайшие 20 лет составит не менее 40% от нынешнего уровня. Причем причины такого «прогресса» носят вполне объективный характер: увеличение населения планеты, естественное желание улучшить качество жизни, нерациональное использование и загрязнение природных источников.

В настоящее время, среди прочих, обозначилась еще одна актуальная проблема – динамика водных ресурсов в зависимости от хозяйственной деятельности. В 50-х годах прошлого столетия резко возросло потребление воды, причем в период с 1900 по 1950 гг. за десятилетие такое увеличение составило 156 км^3 , а с 1950 по 1960 гг. эта цифра увеличилась до 630 км^3 . В последующие десятилетия потребление пресной воды возрастало уже на $800\text{--}1000 \text{ км}^3$ за каждые 10 лет.

Общество в последнее время начало активно реагировать на загрязнение водных поверхностей, в частности, нефтепродуктами. Это отрадно. Нерациональное же использование воды публичному бичеванию пока не подвергается. А зря. Например, в Лондоне ежесуточно до потребителей не доходит около миллиарда литров водопроводной воды.

А в это же самое время на Ближнем Востоке, в Иордании и Израиле каждый седьмой житель испытывает на себе дефицит пресной воды. Аналитики-глобалисты уверены в том, что пока страны ОПЕК озабочены снабжением мира нефтью и уверены, что именно они определяют будущее цивилизации, в скрытой форме в мире развиваются международные картели, основная перспективная цель которых – снабжение пресной водой. Надо полагать, что скоро этот бизнес будет процветать.

7.4. Феномен жизни

До недавнего времени было принято считать, что жизнь на нашей планете представляет собой локальный феномен, который рассматривался в лучшем случае в масштабах Солнечной системы. Такой подход сложился исторически, со времен распространения геоцентрической системы мира Аристотеля – Птолемея, которая поддерживалась в течение более чем 2000 лет христианской церковью, так как нельзя лучше соответствовала основным библейским постулатам.

Библия определяла Землю как Богом избранную планету. Потом с большим трудом и ценой многочисленных человеческих жертв, свое место под солнцем заняла система Николаса Коперника, согласно которой Земле отведено стандартное положение в ряду планет, каковых во Вселенной – не один миллион.

Астрономические данные последнего времени дают ученым основание полагать, что появление жизни на Земле стало возможным вследствие эволюционного процесса всей Вселенной. Если принять гипотезу Большого Взрыва как начальную точку отсчета, то вся двадцатимиллиардная история Вселенной может быть рассмотрена как подготовительный этап возникновения жизни во Вселенной и, в частности, на Земле. Жизнь в этом контексте следует рассматривать как один из закономерных этапов самоорганизации космоса. Согласно современным представлениям Землю нельзя рассматривать как некий изолированный объект, условия которого способствовали возникновению живых организмов.

Земля, как космическое тело, находится под воздействием вещества и физических полей самого различного свойства. Высокоэнергетические частицы и электромагнитное излучение широкого спектра длин волн и энергий, приходящие из дальнего космоса, взаимодействуя с ядрами атомов земной атмосферы и поверхности, рождают вторичные частицы и дополнительные виды излучения. Радиофизикам известно, что мощность излучения в радиодиапазоне галактики Лебедь-А превышает аналогичный параметр Солнца, несмотря на то что находится от Земли на расстоянии 600 млн. световых лет. Солнце по сравнению с Лебедем расположено рядом – на расстоянии всего 8,5 световых минут.

Как отмечалось ранее, в период ранней Земли, когда ее атмосфера только формировалась, уровень радиации Солнца и других космических объектов был существенно выше нынешнего, что тоже внесло свою лепту в формирование условий возникновения жизни. По мнению академика И.С. Шкловского, при взрыве сверхновых звезд синтезируется и выбрасывается в космос огромное по массе количество атомов тяжелых элементов, которые, взаимодействуя с водородом, рождали новые химические элементы, явившиеся строительным материалом планет.

Наша Солнечная система движется вокруг оси, перпендикулярной галактической плоскости, по траектории, в области которой маловероятно активное образование новых звезд и вспышек сверхновых. Если бы такая вспышка произошла на сравнительно малом расстоянии от Солнечной системы, то живые организмы любой организации были бы уничтожены.

Немаловажное значение на возникновение и развитие жизни имеет ритмичность космических процессов, периоды которых исчисляются сутками, месяцами, годами, столетиями, тысячелетиями и даже миллионами и миллиардами лет. Все живые организмы – от простейшей клетки до биосферы в целом – существуют бла-

годаря синхронизации биологических процессов с процессами в неживой природе, включая космические.

Современные данные ученых дают основание считать, что процессы преобразования веществ и энергии в биологических системах любого известного уровня сложности протекают в колебательных, ритмичных процессах, синхронизированных с внешней средой. Исследования изменения во времени различных функций живых организмов показали, что можно выделить многочисленные периодические процессы, которые синхронизированы с ритмами более высокого уровня.

Некоторые колебательные процессы в биологических системах имеют автоколебательный и параметрический характер. В том и другом случае наблюдаются процессы как внутренней, так и внешней синхронизации. Известен показательный пример. Сердце человека представляет собой широко распространенную в природе автоколебательную систему.

Оно являлось предметом исследований Леонардо да Винчи, Галилео Галилея и многих других классиков естествознания. Галилей в своих экспериментах использовал в качестве отметчика времени собственное сердце. При измерении периода колебаний маятника он устанавливал его величину по частоте своих сердечных сокращений – другого «секундомера» не существовало.

Если рядом с лежащим в спокойном состоянии человеком, сердце которого сокращается с частотой 60 раз в минуту, поставить метроном с частотой колебаний 55 колебаний в минуту, то через некоторое время сердце человека подстроится под ритм метронома.

Галилей за единицу времени принял период между сокращениями своего собственного сердца, и эта единица странным образом вписалась в наши минуты, часы, месяцы и годы, короче – в солнечный календарь. Естественно, что такие многофакторные совпадения маловероятны.

Исследователям к настоящему времени удалось установить, что клетки и макромолекулы находятся в зависимости от внешних и внутренних электромагнитных полей. Зарегистрированы циклические изменения распределения поверхностных зарядов и дипольных моментов на уровне клеток и макромолекул. Организмы в целом периодически изменяют свой электрический потенциал.

В лабораториях установлено, что живые организмы разных видов могут обмениваться электромагнитными сигналами и реагировать на внешние электромагнитные воздействия. Мы уже говорили о влиянии солнечного излучения на состояние человека. Вполне вероятно, что есть и другие космические объекты, воздействующие на живые организмы. Человеческая жизнь в целом циклична. Проходят часы, сутки, недели, годы – мы спим, едим, работаем, отдыхаем, рождаемся и умираем в соответствии с этими естественными циклами. Можно считать, что живые организмы упорядочены во времени, поскольку колебательные и волновые процессы с достаточной степенью точности можно прогнозировать на длительные промежутки времени.

Наряду с упорядоченностью во времени живые организмы обнаруживают свойства пространственной симметрии на разных уровнях своей внутренней структуры. Это симметрия атомов, молекул, кристаллических и аморфных структур, которая следует из свойств симметрии основных физических законов, в частности второго и третьего законов термодинамики, которые в сочетании с законом сохранения энергии предписывают всем физическим системам пребывать в состояниях с минимально возможным значением собственной энергии и энергии, обусловленной взаимодействием. Следует упомянуть также о симметрии электрических зарядов в объеме, занимаемом живыми организмами.

В зарождении и развитии живых организмов большую роль играют величины физических констант: гравитационной постоянной, постоянной Планка, массы и заряда элементарных частиц, которые определяют масштабы физических явлений.

Жизнь может возникнуть только на планетах, обладающих вполне определенными астрономическими, физическими и химическими характеристиками. Существует несколько объективных ограничений. Прежде всего следует указать ограничение по массе планеты. Планеты, обладающие малой массой, не могут своим гравитационным полем удержать газовую оболочку – атмосферу. В качестве примера можно взять Меркурий и Луну, хотя последняя и не является планетой в полном смысле этого слова.

Планеты с массой, превышающей $1/20$ массы Солнца ($M_C \cong 2 \cdot 10^{30}$ кг), не могут рассматриваться как планеты, способные генерировать жизнь, потому что в их недрах вследствие гравитационного сжатия протекают термоядерные реакции, приводящие к высоким поверхностным температурам, при которых маловероятно существование живой материи.

Кроме того, на удаленных от Солнца массивных планетах с массами, большими $M_C/1000$, атмосфера вследствие гравитации настолько плотная, что солнечные лучи, по крайней мере в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, не проникают на поверхность в должных количествах. К таким планетам относятся Юпитер и Сатурн. В благоприятный массовый диапазон попадают **Земля, Марс и Венера**. В масштабах Вселенной, по оценкам астрофизиков, массу, удовлетворяющую условиям возникновения жизни, имеют около 1% планет. В абсолютном исчислении это выражается несколькими миллиардами.

Температурные ограничения зависят от того, какая форма жизни предполагается к рассмотрению. Если речь идет об углеродной основе, как на нашей планете, то температура не должна превышать предела температурной стабильности органических молекул, которые разрушаются при температуре $+250^\circ\text{C}$. На поверхности Земли температурный предел составляет $+100^\circ\text{C}$. В области низких температур предельные значения имеют более широкий диапазон. Некоторые простейшие микроорганизмы в состоянии анабиоза могут длительное время находиться при температурах, близких к абсолютному нулю (-273°C).

Температура на поверхности планеты определяется прежде всего параметрами светимости ближайшей звезды и расстоянием до нее. Так, например, в нашей Солнечной системе на поверхности близких к Солнцу планет температура несовместима с известными человеку формами жизни. На Меркурии температура поверхности превышает температуру плавления свинца. Такая же ситуация складывается и на дальних планетах (Уран, Нептун), где температуры поверхности опускаются ниже -200°C . В области благоприятных температур помимо Земли находятся Марс и Венера.

Помимо температурных ограничений существуют так называемые траекторные ограничения. В соответствии с гелиоцентрической моделью Коперника и законам Кеплера планеты вращаются вокруг солнца по эллиптическим траекториям. Если эллипсы имеют большой эксцентриситет, т. е. орбиты планет вытянуты, то на участках максимального приближения к звезде температуры на их поверхности будут выше «жизненного» интервала температур, а на участках максимального удаления – наоборот, температуры опустятся ниже допустимого для жизни значений. Чем ближе по форме траектория планеты к окружности (при соответствующем расстоянии от светила), тем наиболее вероятен на ней процесс зарождения жизни. Эксцентриситет земной орбиты равен 0,017, т. е. она вращается практически по круговой траектории.

Существуют еще ограничения по возрасту звезды. Если считать, что земная жизнь развивается примерно в течение 3,5–4 млрд. лет, то возраст звезды, в окрестностях которой возможна планета с живыми формами, должен превосходить это значение.

Для возникновения живых организмов необходим вполне определенный набор химических элементов, который складывается из звездной и солнечной компонент.

Живые организмы и растения состоят из тех же химических элементов, что и космические объекты, что указывает на единство физического и химического устройства Вселенной. Самым распространенным во Вселенной химическим элементом является водород, на втором месте – гелий. В составе живых организмов и растений лидирующее место занимает кислород, затем – азот и элементы с более тяжелыми ядрами. Живая природа на 92–96% состоит из атомов водорода, углерода, азота и кислорода. Другими словами, живые организмы и растения построены из комбинаций наиболее распространенных во Вселенной атомов.

Водород, кислород и азот в таблице Д.И. Менделеева расположены в первых двух периодах. Атомы этих элементов обладают свойствами образовывать устойчивые кратные связи с другими элементами, что характеризует их высокую реакционную способность. Углерод, входящий в состав живых организмов и растений, обладает способностью создания протяженных цепных структур, что послужило причиной возникновения сложных полимеров, которые сыграли решающую роль при трансформации неживой материи в живую. К биогенным элементам принято относить серу и фосфор. Несмотря на незначительное удельное содержание в организмах и растениях, их роль в протекании сложных биохимических реакций неоспоримо велика.

На протяжении длительного времени, насколько это можно судить по оставленным рукописным и рукотворным памятникам, человечество интересуется обстоятельствами своего появления на Земле. Подтверждением такого неугасающего интереса могут служить построения религиозных теорий – как языческих, так и современных. Во все времена одной из центральных тем религиозной догматики было описание сотворения живых организмов вообще и человека в частности.

К настоящему времени можно выделить несколько основных гипотез, которые особенно интенсивно обсуждаются в научной и популярной литературе, а также во всех средствах массовой информации. Эта тема является своеобразной палочкой-выручалочкой в информационных играх современной цивилизации.

Темой происхождения можно легко отвлечь от насущных проблем миллионы верующих и неверующих людей и вызвать заинтересованную ответную реакцию, причем не прибегая к применению глубоких знаний в области естественных наук. Ввиду давности произошедшего и неосведомленности в тонкостях большинства заинтересованной аудитории можно без зазрения совести лоббировать любую из гипотез, приводя «весомые» аргументы против остальных.

Первая гипотеза, по крайней мере по популярности среди основной массы читателей и телезрителей, основывается на религиозном течении, носящем название **креационизм**. Термин образовался от латинского слова creatio – творение, созидание. Эта гипотеза, как отмечено выше, активно эксплуатируется всеми религиями мира.

Так, например, христианство, ислам и буддизм предполагают в разных формах существование некоего высшего создания – Бога, собственно, создавшего весь сущий мир и управляющий его «работой». По религиозным представлениям, Вселенная, созданная Творцом, имеет недопустимо младенческий, не соответствующий даже приближенно действительности, возраст, составляющий в лучшем вари-

анте несколько тысяч лет. Эта гипотеза, по мнению ее сторонников, наиболее логична по сравнению с остальными. Концепция Творца позволяет все заботы о доказательствах возложить на него же, отметая все вопросы одной сакраментальной фразой: «Такова воля Божья!».

В последнее время, правда, церковь несколько изменила свои взгляды, они стали не так категоричны и всеобъемлющи. В 1996 г. папа Иоанн Павел II в апостольском послании уведомил паству, что католическая церковь частично признает справедливость эволюционной теории в части формирования плоти. За Божьим промыслом оставлена только душа.

Эта гипотеза имеет право на дальнейшее изучение и обсуждение на соответствующем научном уровне хотя бы потому, что факт возникновения жизни на Земле является результатом большого числа маловероятных событий, в организации которых могли помочь «высшие силы».

Вторая гипотеза основывается на возможности возникновения живой материи самопроизвольно из неживой субстанции. Эта гипотеза превалировала над остальными в периоды средневековья и эпохи Возрождения. В 1862 г. Луи Пастер провел серию опытов, показавших несостоятельность этой гипотезы.

Третья гипотеза, в основе которой лежит теория панспермии, т. е. внесение на Землю жизни из необъятных просторов космоса. У этой теории, теории панспермии, на протяжении ее существования с конца XIX в. было много сторонников среди ученых. В разной степени ее поддерживали Кельвин, Гельмгольц, Томсон и др. Несмотря на принципиальную возможность такого факта, есть некоторые серьезные противоречия, такие как длительность путешествия, высокая радиационная и термическая опасность гибели живых образований.

Есть у этой гипотезы и неоспоримые положительные моменты. В живых организмах содержится молибден, которого на Земле слишком мало, чтобы природа решила его использовать в своих живых конструкциях. Кроме того, универсальность генетического кода всех живых организмов дает некоторые основания предположить, что начало жизни произошло от одного «зародыша». Если принять это предположение, то вопрос о самом изначальном месте возникновения жизни по-прежнему остается открытым.

7.5. О происхождении человека

Прошло чуть более 146 лет после того, как 24 ноября 1859 г. английский естествоиспытатель Чарльз Роберт Дарвин (1809–1882 гг.) выпустил в свет свою знаменитую книгу «Происхождение видов путем естественного отбора, или Сохранение благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь». Случилось так, что эта теория за прошедшие полтора века ее существования испытывала периоды головокружительных взлетов, доминируя над другими в течение десятилетий, и периоды, когда подвергалась жесточайшей критике.

Отношение различных групп людей к этой теории стало своеобразным индикатором их интеллектуального потенциала. Сотрудники американского института общественного мнения имени Дж. Гэллапа на основании опроса взрослого американского населения установили, что 45% респондентов безоговорочно верят в свое божественное происхождение, 37% допускают, что они являются продуктом эволюции, но организацию этого процесса приписывают промыслу Божьему.

Только 12% американцев допускают, что человека следует рассматривать как биологический вид, являющийся продуктом естественного отбора. Европейское население мнение «старших братьев» по поводу своего происхождения, можно сказать, не разделяет. В современной Германии 46% опрошенных жителей, не желая, наверное, дискредитировать Творца в своих глазах, сомневаются, что к происхождению человека Бог имел отношение. Такого же мнения придерживается 41% австрийцев и 33% швейцарцев. В России (СССР) до недавнего времени теория Чарльза Дарвина (рис.7.20) имела своеобразный государственный статус, потому что, подобно геоцентрической системе устройства мира Аристотеля в рамках библейской догматики, органически вписывалась в основные положения идеологии.

Как обычно, наиболее яростно критикуют Дарвина совсем не профессионалы, а люди, назначенные быть умными, люди, не читавшие Дарвина даже в популярном изложении.

Особенно в этом преуспевали министры образования. Желая приблизить свою нацию по уровню научного развития к американцам, министр образования Сербии Лиляна Чолич распорядилась вымарать из школьных учебников все упоминания о Дарвине и его теории, заменив их креационизмом, основывающимся на библейском толковании человеческого происхождения.

Возмутились одновременно ученые и политики. Министру пришлось уйти в отставку. Аналогичная попытка была предпринята в Италии, которая благодаря активной позиции лауреата Нобелевской премии Риты Леви-Монтальчини не увенчалась успехом.

Оппоненты обсуждаемой теории в большинстве своем совершенно необоснованно обвиняют автора в полном отрицании божественного влияния. Дело в том, что свою теорию Дарвин разрабатывал в Викторианскую эпоху, и вряд ли бы осмелился замахнуться на религиозные пристрастия сво-

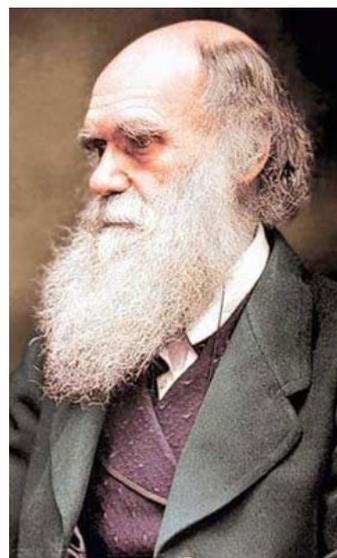


Рис. 7.21. Чарльз Дарвин

их современников. Кроме того, известно, что жена Дарвина Эмма, которой он посвятил книгу, была убежденно верующим человеком.

Теория Дарвина, как и всякая научная теория, имеет естественные ограничения по времени своей справедливости и кругу решаемых вопросов. Как известно, не может существовать теорий, которые бы имели неограниченное время жизни. Это бы остановило эволюцию «от простого к сложному». Теории рождаются, какое-то время живут, уточняются и при необходимости умирают или ложатся в основу новых теорий, которые более удовлетворяют объективной реальности. Это в естествознании закономерно.

Интерес у людей к определению своего места в мире был оформлен в некие трактаты во времена античного всплеска научных способностей рода людского. Упомянутый уже ранее Анаксимандр (610–546 гг. до с. л.), занимаясь теорией мироздания, никак не мог обойти молчанием проблемы первооснов бытия. Этот мудрый грек считал, что все, включая человека, произошло из «айперона» путем последовательных превращений. По представлениям Анаксимандра, человек, в отличие от остальных животных, претерпел большее число этих превращений.

Начала эволюционных представлений можно найти и в трудах первых греческих материалистов, живших до наступления эры «правильных» религий: Демокрита (470–380 гг. до н. э.), Эмпедокла (490–430 гг. до с. л.), Анаксагора (500–428 гг. до с. л.), Сократа (469–399 гг. до с. л.). Очевидно, что вопросами происхождения занимались и ранее, но письменных доказательств этого пока не обнаружено. Философия была не единственной наукой, изучающей человека как объект окружающего мира. Несомненное большое влияние на формирование антропологических взглядов оказал комплекс знаний по зоологии, анатомии человека и животных. Бальзамирование тел египетскими жрецами требовало элементарных знаний устройства человеческого организма.

Большое значение для развития прогрессивных взглядов древних греков имели путешествия, из которых возвращались с описаниями новых местностей и народов и на основе которых были созданы научные трактаты. Лукреций Кар (99–55 гг. до с. л.) в своей знаменитой поэме «О природе вещей» развил идеи предшественников о естественном происхождении органического мира и человека, нарисовав убедительную панораму развития культуры от первобытной примитивности до цивилизованных отношений.

Известно, что Аристотель начал составлять классификацию животных, стремясь определить положение в ней именно человека. В своих сочинениях «История животных», «О частях животных», «О душе» Аристотель выдвинул гипотезу о «лестнице существ», или ряде постепенного повышения уровня организации.

Путешествия венецианца Марко Поло познакомили европейских ученых с естественнонаучными достижениями Древнего Китая и описаниями населения многих азиатских стран. Морские странствия итальянца Христофора Колумба, испанца Васко да Гамы, португальца Магеллана позволили расширить представления о масштабах и свойствах окружающего мира.

В частности, именно в результате великих географических открытий европейцы впервые узнали о существах, удивительным образом напоминающих людей, — обезьянах. Расширение географических масштабов знаний дали первые основания для критики церковной догматики о происхождении всех людей от Адама и Евы.

Современные сравнительные микробиологические исследования с использованием физических и химических методов позволили установить, что дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) представляет собой высокомолекулярное природное соединение, являющееся основным компонентом хромосом всех организмов.

Как полагают ученые, ДНК (рис. 7.22) является носителем генетической информации, ее отдельные участки соответствуют определенным генам. Молекула ДНК образована двойной закрученной спиралью, т. е. состоит из двух цепей.

Цепи состоят из мономеров – нуклеотидов, отличающихся одним из четырех азотистых оснований. Сочетание из трех соседних нуклеотидов в гене является единицей генетического кода. Последовательность расположения нуклеотидов в ДНК для каждого живого организма индивидуальна и определяет его основные признаки. ДНК в точности воспроизводится при делении клеток, что обеспечивает принципы наследственности, т. е. передачу информации. Внешние воздействия или самопроизвольные нарушения структуры ДНК могут вызвать наследственные изменения, именуемые мутациями.

Ученые выяснили, что ДНК человека и птицы совпадают (гибридизируются) всего на 10%, человека и мыши – на 19%, человека и крупных млекопитающих – на 30–40%.

А вот ДНК шимпанзе совпадает с человеческим на 90–98%. Было обнаружено также, что не все шимпанзе генетически схожи с человеком одинаково, причем некоторые породы шимпанзе по структуре ДНК расположены ближе к человеку, чем к своим собратьям.

Особенно близок к человеку по генотипу оказался карликовый шимпанзе. В 1980 г. по результатам пражской конференции генетиков была опубликована статья американских цитогенетиков университета Миннеаполиса Дж. Юниса, Дж. Сойер и К. Данхэма, которая называлась «Поразительное сходство (striking resemblance) окрашенных с высокой разрешающей способностью на полосы хромосом человека и шимпанзе». Выяснилось также, что у обезьян и человека схож состав белков крови и тканей.

Среди большого числа различных родов обезьян, генетически наиболее близких к человеку, ученые выделили так называемых высших обезьян – гоминидов, для которых родство с человеком наиболее просматривается (рис. 7.23.).

По данным анатомических и палеонтологических исследований, шимпанзе и горилла наиболее близки к человеку (рис. 7.24). Далее по степени родства располагаются орангутанг, гиббон и сиаманг. На основании анализа иммунологами показано, что по аминокислотной последовательности белков и гибридизации ДНК ряд родства с человеком выстраивается по такой же схеме.

А что же Чарльз Дарвин? Оказывается, достижения современной генетической науки, так же как и цитологии и иммунологии, не находятся в противоречиях с ос-

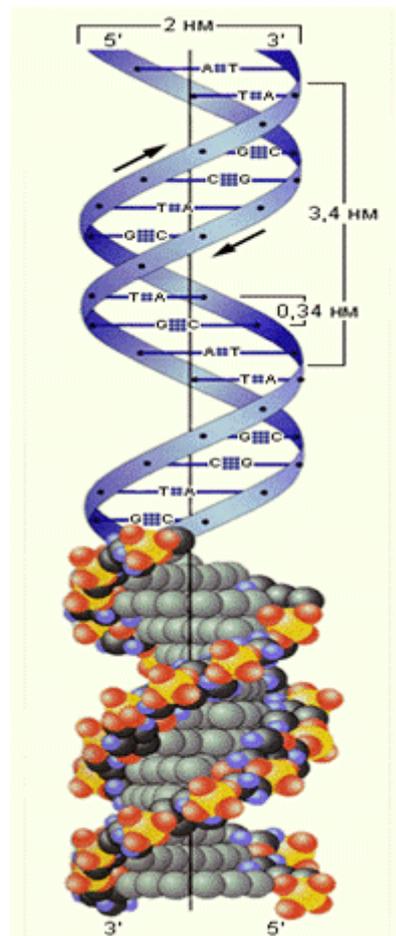


Рис. 7.22. Схема ДНК



Рис. 7.23. Родство по происхождению

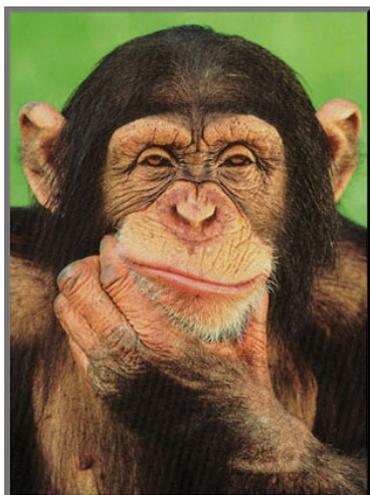


Рис. 7.24. Шимпанзе

новными положениями его теории. Так, например, по поводу происхождения человека он утверждал, что:

- человек, как представитель своего вида, появился в третичный период, т. е. около 3,5 млн лет назад, а быть может, и ранее;
- предки человека произошли от обезьяноподобных существ.

Надо отметить, Дарвин настаивал, что африканские человекообразные обезьяны не являются нашими предками, вероятно, они имели с человеком общего прародителя;

Следуя Дарвину, картину биологической эволюции можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 7.25.

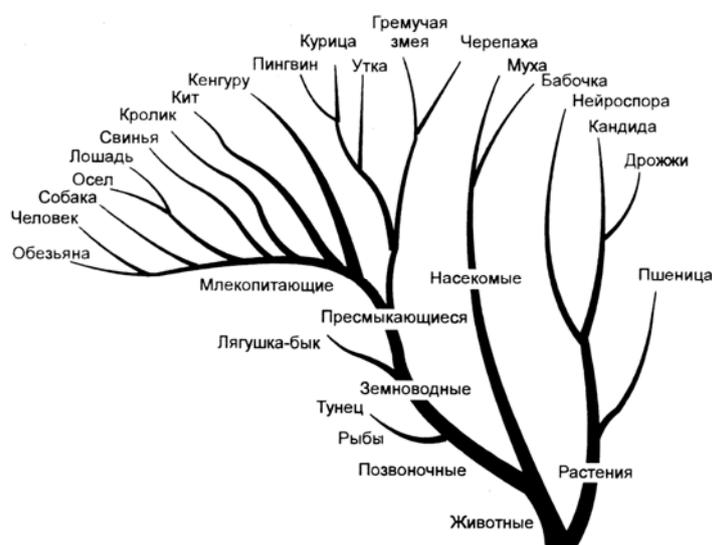


Рис. 7.25. Биологическая эволюция

Теория Дарвина, не претендующая, по сути, на глобальную универсальность, тем не менее находила подтверждение в более поздних результатах исследований. Законы наследственности Грегора Менделя и хромосомной теории Моргана подтвердили фундаментальные основы эволюционных воззрений Дарвина. Открытие Анри Беккерелем явления естественной радиоактивности и последующие за этим исследования позволили определить временные масштабы геологических эпох. Установленная таким образом длительность геологических периодов оказалась достаточной для медленного и последовательного протекания эволюционных процессов.

Теория Дарвина позволяла осуществлять ее дополнение и корректировки. Так, например, Эдвард Коуп выдвинул гипотезу о циклическом вымирании и возрождении некоторых биологических форм. В подтверждение своих предположений он рассмотрел кистеперых рыб, которые вымерли около 100 тыс. лет назад, а теперь объявились вновь.

Действительно, теория Дарвина не содержит прямых указаний об особенностях происхождения человека. Как и во времена мэтра эволюции, вопросы «Когда?», «Где?» и «От кого?» остаются, по большому счету, риторическими, имеющиеся на них ответы могут рассматриваться только на уровне гипотез.

Внесла свой вклад в вереницу невероятных находок и Перу, где обнаружили мумии краснокожих вождей, у которых мозг частично превратился в битум (по сути, в нефть). Возраст мумий составляет 700 лет, а по всем законам геологии нефть могла возникнуть только через миллионы лет. Вот такие временные накладки. И это еще не все.

В Перу, по заявлениям французского исследователя непознанного (есть и такие), имеется тайный музей, где собрано до 15 тысяч камней, на которых методом высокоточной гравировки изображены сюжеты, отражающие жизнь доисторических ящеров. На этих же камнях, возраст которых датируется 60 млн. лет до новой эры, изображены и люди. Люди на камнях изображены рядом с ящерами – стегозаврами, тираннозаврами и брахиозаврами длиной до 25 м и весом до 50 т. Есть изображение хирургов, астрономов, жилых домов, удивительно похожих на современные строения. А жили они на Земле более 140 млн. лет назад. Информация на камнях позволяет заключить, что обезьяноподобные существа находились в подчинении у людей. Сообщается также, что на этих «каменных летописях» есть изображение рядом с людьми первой птицы, появившейся в процессе эволюции – хеоптерикса. Эта птичка величиной с ворона жила 180 млн. лет назад.

Сенсационные находки время от времени делают много шума, но, будучи подвергнутыми анализу специалистами, вызывают только улыбку. На острове Ява голландский врач Эжен Дюбуа нашел в 1892 г. кости существа, совмещавшего в себе признаки человека и обезьяны. Возраст костей составлял около миллиона лет. Эта «находка» осталась не замеченной специалистами.

Затем в 1907 г. настала очередь Европы. В Германии обнаружили останки питекантропа – «гейдельбергского человека». Кости, по мнению ученых, пролежали в земле 600 тыс. лет. В Англии в г. Пилтдауне был обнаружен череп, который, судя по верхней части черепа, принадлежал человеку, а вот нижняя челюсть была явно от обезьяны. В 1912 г. Королевское геологическое общество выступило с официальным заявлением о пилтдаунской находке, сообщив дополнительно, что наряду с черепом человекообезьяны обнаружены достаточно виртуозно обработанные каменные орудия труда, кости гиппопотама, носорога и других живших не менее миллиона лет назад животных. Это был перебор. При более тщательном исследовании оказалось, что находка представляет собой профессиональную фальсификацию. Нижняя челюсть принадлежала современной обезьяне, она была умело искусственно состарена и подточена, так сказать, по размеру.

Естественно, что некоторые археологические находки, сделанные в последнее десятилетие, заслуживают внимания. Следует отметить, что ни одна из них не содержала прямого доказательства нашего космического или божественного происхождения. Новые сведения заставляют пересматривать отдельные положения антропологических теорий, вносить изменения в них, но пока что по всем имеющимся признакам роднее шимпанзе у нас никого нет!



Рис. 7.26. Загадки эволюции

7.6. Дорога в никуда

Как отмечалось ранее, в самом начале прошлого XX века ученые начали, вначале робко, а потом все настойчивее говорить о свидетельствах, указывающих на планетарные масштабы антропогенного воздействия человеческого сообщества на окружающую среду: атмосферу, гидросферу и биосферу. Человек, как и предупреждали, В.И. Вернадский и А.Е. Ферсман, стал в отличие от прочих живых существ геологической силой.

Несмотря на несомненные успехи естественных, экономических, информационных и гуманитарных наук в целом, по мнению многих международных экспертов, человечество живет не намного лучше, чем в прежние времена. На Земле по-прежнему живут миллиарды людей, не умеющих писать и читать, миллиарды людей остаются без работы, не имея средств к существованию, треть населения планеты вынуждена жить на один доллар США в сутки. Миллиарды людей испытывают постоянную нужду в пропитании и качественной пресной воде.

Конечно, из более чем шестимиллиардного населения нашей планеты можно выделить его шестую часть, живущую в странах пресловутого «золотого миллиарда», которая, не в пример остальным, пребывает в комфортабельных во всех отношениях условиях и наслаждается всеми достижениями современной цивилизации.

Вместе с тем озабоченные, как обычно, ученые, которых все, кому не лень, обвиняют в сгущении красок как минимум, уже говорят о постановке вопроса о существовании теперешней цивилизации в действующих рамках ее идеологии. Все чаще и убедительнее становятся доводы специалистов, предупреждающих, что следование выбранным курсом может кончиться так же, как и плавание для «Титаника».

Для сохранения существующей цивилизации людям требуется, по мнению экспертов Всемирного фонда дикой природы, в ближайшее время всего-навсего колонизировать как минимум две планеты. Согласно выводам экспертов, человек настолько интенсивно использует ресурсы Земли, что вскоре ее способность поддерживать жизнь достигнет критического уровня. И с этим трудно не согласиться.

Не секрет, что Земля в последние десятилетия быстро истощает свои запасы, а просвещенное во всех отношениях человеческое сообщество, исповедуя совершенно аномальный прагматизм и осознавая невозможность пополнения запасов, продолжает с невиданной неутомимостью забирать их и далее. Особенно это касается лесных, рыбных и почвенных ресурсов. Ученые прогнозируют, что к 2030 г. ситуация может стать критической. Один из ведущих экспертов Всемирного фонда дикой природы Джонатан Лоу считает, что человек настолько интенсивно использует ресурсы планеты, что вскоре ее способность поддерживать жизнь достигнет критического уровня. Если эксплуатация естественных богатств Земли продолжится в таком же темпе, то уже к 2050 г. большая часть человечества столкнется с опасностью остаться на истощенной территории. Другими словами, цивилизации осталось «безбедно» жить всего 48 лет.

Действительно, многие эксперты сходятся во мнении, что около трети природных ресурсов Земли было использовано (кстати, весьма расточительно и бездарно) за последние 300 лет. Ежегодно земная цивилизация использует природных

ресурсов примерно на 20% больше, чем может быть восстановлено планетой. По мнению Лоу, к 2050 г. человеческое сообщество будет потреблять 180–220% биологических ресурсов Земли. С 1970 г. количество видов птиц и животных, проживающих в лесах, снизилось на 15%, морских животных – на 35%, а проживающих в речных водах – на 54%.

Если даже оценки специалистов завышены в два раза, то и в этом случае тенденция последствий «освоения» природных запасов очевидна. Наиболее ощутимый ущерб окружающей среде наносит Северная Америка, особенно это относится к США. Эта страна, называя себя радетелем за благополучие всех народов, является лидером по выбросу вредных веществ в атмосферу и чемпионом по потреблению всех земных благ.

Экспертами Всемирного фонда дикой природы установлено: для того чтобы обеспечить продовольствием одного американца, требуется в среднем 12,2 га земли, в то время как в Великобритании эта цифра составляет 6,2 га, а вот в «процветающей» Бурунди – 0,5 га. Нетрудно видеть, что рядовой американец и рядовой бурундиец имеют несколько различные потенциальные возможности чего-нибудь в природе сэкономить. На каждого жителя Земли в среднем приходится примерно 1,9 га сельскохозяйственных угодий, что в 3,26 раза меньше «американского стандарта». Вот такая простая арифметика, вот такое равенство и чисто человеческое братство.

Естественно, что идея колонизации пары подходящих планет так же несбыточна, как и чеканка денег из лунного света. В этой связи экспертами Всемирного фонда дикой природы предлагается правительствам экономически развитых стран снизить нормы потребления «даров природы». Разумная рекомендация, только кто же их, этих экспертов, станет слушать. Не для этого затевалась глобализация экономики планеты, чтобы серьезно заниматься уравниловкой желаний и возможностей.

И если человечество в целом еще не созрело для принятия адекватных обстоятельствам решений и организации в планетарном масштабе соответствующих решительных действий, то тенденции некоторых стран к анализу своих возможностей уже налицо. Так, например, Китай в течение последних четырех лет занимался учетом своих потенциальных сырьевых возможностей [59].

Министерство земельных и природных ресурсов Китая осуществило оценку запасов полезных ископаемых по международному стандарту классификации. После образования КНР запасы полезных ископаемых долгое время классифицировались по модели бывшего СССР. По мере перехода китайской экономики к механизму рыночных отношений постоянно активизировалось сотрудничество Китая с иностранными инвесторами в рудодобывающей сфере.

Устаревшая классификация ископаемых стала препятствовать сотрудничеству с другими странами, в которых действует общепризнанный международный классификационный стандарт. Как показали итоги оценки запасов полезных ископаемых по новому стандарту, в настоящее время Китай относится к странам с наибольшими запасами полезных ископаемых. Однако объем экономически выгодных запасов составляет только одну треть от общего объема запасов страны. Другими словами, разработка в настоящее время экономически нецелесообразна.

Оказалось, что из 148 видов полезных ископаемых доля разведанных запасов составляет лишь 10,63%. С учетом демографической ситуации Китай в пересчете запасов на одного жителя своей страны занимает в мире только 53 место.

Еще одной страной, имеющей достаточно большие в масштабах планеты запасы полезных ископаемых и не использующей в полной мере свой сырьевой потен-

циал, является Иран [60]. В результате проведенных в последнее время геолого-разведочных работ в Иране установлены запасы 60 различных полезных ископаемых, и еще по 14 видам полезных ископаемых разведка продолжается. Доля промышленности, в том числе и горнодобывающей, в валовом национальном продукте составляет 17%, причем на горнодобывающую промышленность приходится всего 6%.

Геологи утверждают, что Иран находится на одном из важных поясов залегания полезных ископаемых и его вполне обоснованно следует считать богатейшей страной по запасам, по крайней мере, десяти видов минеральных ресурсов. Как показывает статистика, запасы металлов вместе с каменным углем, строительными материалами и промышленными минералами составляют 6 млрд. т. Все разведанные запасы полезных ископаемых превышают 24 млрд. т, и при этом значительная часть территории страны не изучена с точки зрения наличия полезных ископаемых. На данный момент в стране добывается только 5% от всех ресурсов.

В Иране существует более 2000 рудников и шахт, на которых ежегодно добывается около 100 млн. т полезных ископаемых. Страна располагает 10% разведанных мировых запасов нефти, 14% запасов газа, 3,5% меди, 5% свинца и 2% цинка.

Становится понятным, почему американцы в последнее время так стали заботиться о правах человека в этой стране и возмущаться крайне низким, по их американскому стандарту, уровню демократизации общества. На этот раз акция по «приватизации» иранских богатств началась под эгидой атомной программы обогащения урана, которая, опять же по мнению американской администрации, может привести к созданию бомбы, с которой террористы могут напрямиком направиться в Вашингтон. В Ираке искали химическое оружие, а тут целая атомная бомба с нефтью, газом, медью, свинцом и цинком. Все мы свидетели, как уже по накатанному иракскому сценарию раскручивается компания по подготовке общества к необходимости вторжения в Иран. Уже состоялась демократизация Афганистана, Ливии и Египта. В обойму вставлена Сирия.

Кстати об Ираке, который до Второй Мировой войны в заливе имел численность населения 24 млн. человек, причем на каждую иракскую женщину приходилось 4,75 родившихся детей, т. е. это была страна со значительным демографическим потенциалом. После введения по инициативе США санкций, официально объявленной причиной которых было наличие в Ираке промышленных мощностей по выпуску химического оружия, смертность детей в возрасте до 5 лет возросла в два раза и составила 133 ребенка на 1000 человек. В США этот показатель составляет всего 8 человек. К началу полномасштабной «демократизации» Ирака союзными войсками грамотность населения с 89% снизилась до 57%, продолжительность жизни уменьшилась с 62 до 56 лет. Таковы последствия предпринятых санкций. Картина происходящего сейчас на севере Африки не нуждается в особых комментариях.

Таким вот путем развивается эволюционный процесс на нашей планете. В XIX веке казалось, что возможности естествознания безграничны. Человечество всегда было склонным переоценивать свои возможности. Примеров тому масса.

В конце XIX века классическое естествознание покоряло один природный бастион за другим. Фундаментальное описание картины мира, как тогда казалось, вот-вот будет завершено. Оставались маленькие штришки. Если говорить о физике, то оставались две пустяшных нерешенных задачи.

При исследовании излучения абсолютно черного тела результаты теоретического анализа методами волновой механики не совпадали с экспериментальными результатами. Да еще с фотоэффектом были некоторые тактические неясности. А в остальном

все казалось понятным от начала и до конца. Мэтры в те наивные времена не рекомендовали молодежи заниматься теоретической физикой ввиду отсутствия в этой области интересных задач.

Но случилось так, что анализ подробностей излучения абсолютно черного тела и излучения освещенной поверхностью металлов электронов привело к возникновению квантовой механики, которая ознаменовала наступление новой эры в физике. Классическое естествознание стало частью общих представлений о строении материи.

Увеличение разрыва в уровнях распределения благ цивилизации среди населения разных стран создает благоприятные условия для возникновения ожесточенных расовых, этнических и религиозных конфликтов. Технический прогресс человечества, не способный эффективно противостоять физическим напастям на тела людей, весьма эффективно способствует глобальному информационному мошенничеству, торговле наркотиками, оружием, человеческими органами и людьми. И конечно же, терроризму, который в духе нового времени наряду с традиционными взрывами и убийствами использует Глобальную телекоммуникационную сеть для организации крупномасштабных вирусных атак.

Найти выход между несоответствием желаний и возможностей при теперешнем устройстве мира весьма сложно, если вообще такой выход существует. Возможности человечества ограничиваются нагрузкой, оказываемой густонаселенными районами проживания на окружающую среду при использовании энергетических и материальных ресурсов, необходимых для ведения сельского хозяйства и промышленного производства. Кроме того, рост населения земного шара, несмотря на отмеченные выше сдерживающие факторы, углубляет противоречия между желаниями и возможностями.

Все большему числу здравомыслящих людей становится ясным, что традиционными методами и средствами переломить пагубные тенденции невозможно. Не маячит на временном горизонте некая универсальная идея, способная сделать наш мир более лояльным к человеку вообще, а не только к малой части человечества.

Весь перечисленный негатив имеет еще одну особенность. Дело в том, что, несмотря на прошлые успехи естественнонаучного комплекса дисциплин, в настоящее время многие аналитики отмечают устойчивое снижение скорости локомотива – физики.

Чтобы осознать этот на первый взгляд невероятный факт, достаточно вспомнить, что в последнее время Нобелевские премии по физике присуждаются за работы, выполненные несколько десятков лет назад. Это говорит о том, что в физике не возникают прорывные теории и не проводятся основополагающие эксперименты. А насущных проблем у физиков, как и у химиков, геологов, географов, биологов, предостаточно. О некоторых из них уже говорилось.

Следует признать, что естествознание, как и все общество в целом, переживает **очередной системный кризис**, который протекает на фоне непрерывного стремления к энерготехническому насыщению жизни современного общества, что в конечном счете может **привести полному несоответствию желаний и возможностей**.

Впрочем, как утверждают астрономы, цивилизации погибают или деградируют не только в результате своей деятельности, но и в силу космических катаклизмов. Если сравнить возраст планеты Земля со временем, прошедшим с момента появления жизни, с возрастом человечества и учесть вероятность столкновения Земли в течение ее истории с астероидами и кометами, то можно предположить, что жизнь, в том числе и разумная, деградировала на Земле не один раз.

Следовать в никуда можно двумя существенно разными способами. Можно, как теперь, постепенно влиять на природу всеми имеющимися мирными способами и средствами: исторгать в атмосферу парниковые газы, покрывать поверхность Мирового океана нефтяной пленкой, повышать постепенно энтропию окружающего пространства, изводить леса и сокращать площади, покрытые растительностью и т. д. Способ, конечно, верный, но относительно долгий. Велика Земля-матушка, массивна, потому и «инертна гораздо». Нужно еще ждать неизвестно сколько, пока она заметно, без двусмысленных намеков,отреагирует на потуги человечества. Этот путь, точно, в никуда, но длинный.

Но есть, есть путь тоже в никуда, но гораздо короче. Надо повоевать, причем всего несколько часов, максимум сутки, но – используя при этом все, что для этих целей припасено. Опыт, какой-никакой, есть. В более чем 900 военных конфликтах, произошедших до 1900 г., людей погибло в семь раз меньше, чем в Первой мировой войне. Вторая мировая война унесла жертв в четыре раза больше, чем первая. Другими словами, в двух последних мировых войнах человеческих жизней было загублено примерно в 11 раз больше, чем за всю историю человечества до 1900 г.

По отношению к природе все упомянутые выше войны были относительно «гуманны». С ущербом, наносимым поверхности и атмосфере воюющими «венцами творения», планета справлялась в своем масштабе времени быстро, а разрушенные искусственные строения было кому восстанавливать. Природа «адаптировалась» к постоянным военным «игрищам».

Когда шла война за «демократизацию» Вьетнама, американские бомбардировщики сбрасывали на страну сотнями тонн напалм, стремясь выжечь зеленый покров джунглей, в котором хозяйничали «несознательные» вьетнамские партизаны. Партизаны прятались в норы в буквальном смысле этого слова, а выжженные поверхности в очень короткий срок снова становились непросматриваемыми с высоты полета самолетов и вертолетов.

Третья мировая война, судя по имеющимся предположениям, будет одновременно и последней. По крайней мере, первые эксперименты окончились более чем «успешно». За несколько секунд было уничтожено более 300 тыс. мирных японцев. В средневековой Европе приходилось воевать десятилетиями, чтобы «достичь» таких результатов. А тут в считанные секунды.

7.7. Перспективы «разума»

Ранее были приведены качественные «кривые разума», из которых видно, что изменение интегрального уровня естественнонаучных знаний, которыми располагала цивилизация в разные периоды своего развития, имели существенные отклонения от законов эволюционного развития.

Были взлеты, например, в период неолитической революции и на стыке «старой» и «новой» эры. Наблюдались и периоды длительного «застоя», как в средние века новой эры. Эти данные отражают абсолютный уровень знаний, причем априори было принято, что максимальное значение естественнонаучного потенциала было достигнуто к концу XX в. Однако такой подход не дает возможности проследить, насколько динамично развивался отдельный человек как представитель вида *homo sapiens*, каковы закономерности развития уровня сапиентации.

В этой связи уместно вспомнить Пифагора и его последователей, которые одними из первых еще во времена Древней Греции поняли: чтобы охарактеризовать явления на количественном уровне, нужно соотнести их с некими числами, которые можно сравнивать между собой. Чтобы отойти от понятий «меньше» или «больше», «скорее» или «медленнее», необходимо располагать системой соответствующих физических или иных единиц, нормированных относительно естественных или искусственно введенных констант. Одним словом, для характеристики явлений нужна система мер.

За всю историю цивилизованного населения Земли (это порядка 6000 лет) по инициативе *homo sapiens* было «организовано» более 14 тыс. войн в которых, по подсчетам ученых, раньше отведенного природой срока ушли из жизни около 3,6 млрд. человек. Таким образом, ежегодно происходило в среднем по 2,33 военных конфликта, при этом в каждом из них умерщвлялось по 257 тыс. человек. Несомненно, что эта статистика не претендует на абсолютную достоверность, но порядки величин сохраняются и при более скрупулезных подсчетах.

Людские потери в войнах, отмеченные в официальных документах, заставляют усомниться в том, что *homo* действительно является *sapiens*. Разумности в действиях человека за всю историю его существования, судя по приведенным ниже данным, не прибавилось, а даже совсем наоборот.

Можно на этот счет привести следующие красноречивые примеры:

- за один день войны в 451 г. между гуннами и римско-франкскими войсками погибло на Каталонских полях до 300 тыс. человек;
- в битве на Куликовом поле в 1380 г. полегло с обеих сторон более 200 тыс. человек;
- военные игрища против России, затеянные Наполеоном, стоили жизни 250–280 тыс. человек с каждой противоборствующей стороны;
- за период Первой мировой войны (1914–1918 гг.) в общей сложности цивилизация потеряла 10 млн. человек;
- интервенция стран Антанты в Россию и последовавшая затем Гражданская война, по оценкам исследователей, стоила жизни 8–13 млн. человек;
- Вторая мировая война (1939–1945 гг.) привела к гибели на фронтах и в

тылу 62 млн. человек.

- После окончания Второй мировой войны, после столь устрашающих потерь в людском и экономическом эквиваленте и при условии владения атомным оружием создалась иллюзия, что homo начнет двигаться в сторону sapiens. Организовали Организацию Объединенных Наций, провозгласив недопустимость военных конфликтов без согласования с этим международным органом. Но человечество упорно не желает жить в мире. Об этом говорят факты:
- 1945–1949 гг. – гражданская война в Китае с участием основных организаторов ООН – США и СССР, естественно, по разные стороны баррикад;
- 1945–1950 гг. – война за независимость Индонезии;
- 1945–1954 гг. – Франция воевала в Индокитае;
- 1948–1949 гг. – за место под солнцем воевали Израиль и палестинские арабы;
- 1949 – 1953 гг. – американцы отстаивали свои национальные демократические интересы в Корее;
- 1954 г. – США отстаивали свои интересы путем организации войны в Гватемале;
- 1954–1962 гг. – Франция воевала в Алжире;
- 1956 г. – Израиль, Франция и Англия воевали в Египте;
- 1961–1980 гг. – война в Анголе при участии ЮАР и Кубы;
- 1964–1975 гг. – американцы пытались демократизировать Вьетнам;
- 1773 г. – агрессия Израиля против Египта;
- 1975–1976 гг. – войска Израиля и США воевали в Ливане;
- 1979–1990 гг. – война в Никарагуа;
- 1979–1989 гг. – гражданская война в Афганистане с интернациональной помощью СССР;
- 1974–1994 гг. – война в Эфиопии;
- 1980–1988 гг. – иранская война с применением химического оружия;
- 1988 – 1994 гг. – Армения и Азербайджан, получив право на самоопределение, выясняли отношения военным путем;
- 1992–1994 гг. – война абхазов с грузинами за независимость;
- 1999–2001 гг. – нападение стран НАТО на Югославию;
- 2003 г. – Вторжение США в Афганистан;
- 2003 г. – вторжение армии США и союзников в Ирак.

Таким образом, за 60 календарных лет, охваченных последними данными, цивилизация воевала более 130 лет. В среднем каждый год на планете происходило по 2,17 военных конфликта. Надо сказать, что эта цифра всего на 7% отличается от аналогичного показателя за всю историю человечестве (2,33). Другими словами, «разума» у человечества не прибавилось за всю его долгую историю. По-прежнему процветает принцип из времени неандертальцев; «Сила есть – ума не надо!».

Можно с уверенностью сказать, что мегатонные мощности взрывов пустили в буквальном смысле на ветер весь самый передовой интеллектуальный потенциал цивилизации. Если бы все миллиарды денег в долларовом эквиваленте были израсходованы на науку, приносящую реальные блага для цивилизации, то ситуация на нашей планете была бы совсем иной. Наш общий дом был бы намного комфортнее и перспективнее.

Заключение

Читатель вправе задать себе и окружающим законный вопрос: «Почему так? Почему жизнь, возникнув на весьма приспособленной для этого планете, к настоящему времени подвергается таким неестественным испытаниям? Как могло случиться, что созданные природой уникальные благоприятные условия ухудшаются целенаправленными коллективными и индивидуальными действиями самых высокоорганизованных представителей живой материи?»

Попытаемся сформулировать некоторые предпосылки возникновения кризисной или предкризисной ситуации в процессе взаимодействия человеческой цивилизации и природы.

На заре своего существования человеческие сообщества по целому ряду объективных причин были вынуждены жить в единении с природой, гармонично вписываясь в ее многообразие, затем суть взаимодействия изменилась. Человек, вначале исподволь, а потом все интенсивнее начал и интенсивнее приспособлять природу под свои нужды.

Между природой и человеком им же самим начала возводиться технологическая стена. Это назвали технологической революцией. Жить становилось лучше, жить становилось веселее. Цивилизация создавала свою собственную природно-технологическую среду, законы функционирования которой отличались от естественных законов эволюции природы.

На определенном этапе развития технологических устремлений человечества оно стало самостоятельным геологическим обстоятельством, влияющим на эволюцию природы. Вернадский, созерцая начальные этапы такого влияния, будучи большим оптимистом, предсказывал гармонию человека и природы, новый феномен единения, прекрасный во всех отношениях, как для человечества, так и для природы. Таким же оптимистическим образом были настроены Мичурин, Циолковский и еще целый ряд оптимистов романтического уклона.

На самом деле никакой гармонии не произошло. Принципы отношений между людьми были в самом худшем варианте перенесены на процесс взаимодействия с природной средой. Так же агрессивно воевали, не ожидая милостей. Не заглядывая в перспективу, наращивали потребительские притязания по принципу: «Мы за цену не стоим!».

В последние десятилетия к технологическому размежеванию с природой добавилась новый феномен революционного характера. Цивилизация вступила в эпоху глобальной информатизации, создавая уже не технологическую, а виртуальную информационную среду с ограниченно предсказуемыми последствиями.

Появились принципиально новые возможности создания экономического благополучия части населения, непосредственно не связанного с материальной стороной производства.

Стало возможным делать деньги из ничего, не создавая материального, а занимаясь только манипулированием циркулирующей по миру информации. Стало возможным, например, с просторов какой-нибудь Гваделупы организовать экологический или экономический кризис в одной из азиатских или европейских стран или даже спровоцировать военный конфликт. Для этого не нужно прикладывать никаких усилий, надо только уметь воспользоваться соответствующими информационными потоками.

Политические, военные и экономические процессы, протекающие на нашей планете, управляются не логикой и здравым смыслом, а стремлением отдельных государств овладеть как можно большими природными территориями, имеющими в настоящее время или в перспективе сырьевой потенциал. Все от этого.

Стремление управлять сырьевыми запасами стало определять основную стратегическую линию развития межнациональных отношений. И неважно, в какие одежды это стремление рядится – во внешне привлекательные демократические одеяния или в более сдержанный ближневосточный наряд с террористическими элементами.

Наряду с изменением основных методов и средств взаимодействия человека с природой изменилась и роль науки в развитии общества. По мнению М.Г. Делягина, председателя Президиума Института проблем глобализации и бывшего члена Совета по внешней и оборонной политике России, немаловажной причиной сложившейся ситуации во взаимодействии человека с природой является утеря современным комплексом фундаментальных наук, прежде всего естественнонаучного и экономического направлений, лидирующих положений в определении стратегических путей развития.

Как отмечалось нами ранее, основные финансовые потоки в середине и конце XX в. имели явно выраженную милитаристическую направленность. Фундаментальные исследования финансировались в лучшем случае по остаточному принципу. Сопряжение объемов финансирования с экономической эффективностью разработок поставило науку в очень жесткие условия – условия выживания. За прошедшие 50 лет сложилась ситуация, когда все финансовые поступления направлялись как в нашей стране, так и за рубежом на исследования, обеспечивающие практические потребности цивилизации. Наука решала и решает в основном задачи сиюминутные. Наука оказалась в таком же положении, как и до I в. до с. л., разумеется, на новом технологическом уровне.

Почему наука Древней Греции, Древней Индии и некоторых других стран претерпела коренные методологические изменения, выплеснув «на-гора» таких ярких представителей homo sapiens, как Фалес Милетский, Пифагор, Платон, Архимед, Герон Александрийский, Евклид, Платон, Гиппократ, Аристотель, Авиценна и многих других, включая математиков Древнего Китая, Индии и арабского Востока? Да потому, что, по образному выражению классика марксизма Ф. Энгельса, наука перестала быть служанкой практических потребностей общества, а превратилась в самостоятельную движущую силу.

В настоящее время произошла обратная трансформация – наука снова приобрела обслуживающие функции. Подавляющее большинство современных передовых научных знаний и технологий сосредоточилось в кругах ученых-практиков, которые ввиду своего функционального предназначения занимаются решением узкого круга краткосрочных специфических задач, обеспечивая сиюминутные потребности отдельной государственной структуры, отрасли, корпорации, организации, отдела и т. д.

Ученые-практики используют в своей деятельности в основном хорошо отработанные и апробированные приемы и методики на уровне стандартных алгоритмов, не позволяющие установить долгосрочные результаты деятельности и сформировать научно обоснованные оптимальные программы.

Такая деятельность направлена на получение максимального экономического эффекта в возможно короткие сроки и характеризуется процессами быстрого получения информации, ее обработки и экспрессного использования, без анализа сопровождающих явлений и их перспективного влияния на обслуживаемый процесс.

Достаточно большие и, что самое главное, хорошо оплачиваемые коллективы ученых в настоящее время ангажированы крупными межгосударственными корпорациями и политическими группировками, что делает их изначально ориентированными на соответствующие интересы этих структур. Это чревато искажением результатов как на уровне сбора исходных данных, так и на стадии последующего анализа. Таким образом, не объективные факты, а желание и политическая ориентация заказчиков предопределяют результаты исследований.

Научный потенциал в этом случае прикладывается к набору сугубо тактических задач, отягощенных второстепенными обстоятельствами. Наука коллекционирует частные случаи и подробнейшим образом их описывает с целью поиска возможности получения пресловутого экономического эффекта. Выходит так, что финансируются исследования, направленные на уточнение уже известных естественнонаучных и экономических фактов.

Подобный подход к науке, как средству обеспечения экономических дивидендов, можно рассматривать как некую современную идеологическую установку. Подтверждением такого предположения может служить ситуация, складывающаяся в системе образования, где в последнее время, по крайней мере у нас в стране, насаждается эйнштейновский метод.

Гений всех времен и одного народа, великий популяризатор чужих идей считал, что главным способом образования является обучение на примерах. Как в средние века. Аристотель прав, потому что он, Аристотель, и все должны считать, как он считает. А кто усомнится, того проверят на наличие в нем самом дьявольского начала. И если что, то помогут изгнать беса проверенными способами. Джордано Бруно и Галилео Галилей испытали на себе эффективность такого подхода в установлении научных истин. Кому не нравится пример с Аристотелем, можно обратиться к другому примеру – деятельности вождя мирового пролетариата. Тот же самый подход в оценке правоты собственных взглядов.

Отечественная система образования, возникшая в свое время на основе немецких методик и развитая в лучших традициях мирового научно-педагогического опыта и достижений отечественных научных школ, была во времена существования СССР одной из лучших в мире. Это признавали все. От наших идеологических противников до ныне действующего президента. Основой образования всех уровней – от школьного до университетского – было изучение фундаментальных законов мироздания с широким использованием математических и физических представлений, на основе которых формировались навыки практического применения получаемого комплекса знаний.

Например, подготовку инженеров по эксплуатации ДВС можно осуществлять двумя принципиально разными способами. Можно подробно изучить конструкторские решения нескольких самых современных образцов, снабжая будущего специалиста подробными сведениями об их эксплуатационных характеристиках. При этом глубина знаний математики, физики и других фундаментальных дисциплин выбирается исходя из необходимости понимания специалистом только основных принципов работы двигателей.

Объем физико-математических и естественнонаучных знаний сужается до уровня фрагментарных представлений. Такая идеология обучения экономически выгодна, не требует предшествующей фундаментальной подготовки, но эффективна в узкой области использования инженера и в ограниченном промежутке времени. Однако такой специалист не способен продолжать образовательный процесс самостоятельно, он не может ввиду скудости фундаментального кругозора поддерживать свои профессиональные знания на постоянно высоком уровне. Та-

кая идеология реализуется в большинстве образовательных заведений США и подражающих им странах.

Второй, экономически более затратный способ, реализовавшийся в подавляющем большинстве вузов СССР, строился на изучении тщательно продуманного и сбалансированного сочетания комплекса фундаментальных, гуманитарных и прикладных дисциплин. Основу фундаментального цикла составляли сведения из высшей математики, физики, химии и других смежных общеобразовательных предметов. Второй этап образования предусматривал углубление физико-математических знаний. Только на третьем этапе изучались дисциплины, отражающие специализацию инженера. Такой подход обеспечивал выпускникам вузов объем знаний и умений, вполне достаточный для организации самостоятельного повышения своей профессиональной квалификации.

Напомним, что американцам на протяжении прошлого столетия пришлось три раза вынужденно пересматривать свои образовательные идеологии. Первый раз это произошло после создания в кратчайшие сроки в СССР атомного оружия, второй раз – после запуска нашей страной первого искусственного спутника, третий – после полета в космос Юрия Гагарина.

Американцы были вынуждены выпустить целую серию новых учебников по математике, физике и химии, копируя во многом наших известных авторов. Для американцев было удивительно, как стали возможны такие технические достижения в стране, перенесшей столь разрушительную войну.

Оказалось, что наряду с прочим, главную позитивную роль сыграл фундаментальный уровень подготовки наших специалистов. Советские ученые и инженеры продемонстрировали уникальную способность быстро адаптироваться в новейших областях знаний, создавая передовые технологии и их инженерные реализации.

По мнению некоторых специалистов, одной из причин такого варварского и скоротечного способа перестройки экономики, политики, идеологии и образования нашей страны **стал ее недостижимо высокий научно-технический потенциал**, особенно в военных областях. Следует вспомнить, что вся история России и СССР состоит из периодов интеллектуального и экономического подъема и обвального спада. Октябрьская революция с последующей Гражданской войной, Великая Отечественная война и пресловутая перестройка – предвестница развала великой страны – все это навеивает определенные мысли о неких закономерностях в нашей истории.

Отсутствие необходимых и востребованных фундаментальных знаний можно проследить не только на примере отдельных стран, но и в основных чертах классической и современной науки. Запишем еще раз математические уравнения двух основных физических законов мироздания, один из которых превалирует в мегамире, а второй в микромире. Имеются в виду закон гравитации Ньютона и закон Кулона для точечных электрических зарядов:

$$\vec{F}_G = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}; \quad \vec{F}_K = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^3} \vec{r}.$$

Несмотря на широчайшие применения этих законов в научной, практической и бытовой деятельности человека, их подлинный фундаментальный смысл до настоящего времени не установлен. Так и не выяснены источник гравитации и физическая сущность электрического заряда. Человеку открылись только частности этих законов, и он использует только их. Посмотрите, однако, чего он достиг. А если бы открылся полностью их фундаментальный смысл? То-то и оно: «Есть многое на свете, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам».

Приоритетное финансирование военно-промышленных комплексов, конечно же, тормозило развитие фундаментальной науки. Романтически настроенные архитекторы перестройки уверяли доверчивую и добровольно наивную научную интеллигенцию, что, даже проиграв в холодной войне идеологическому противнику, все выиграют, потому что в мире исчезнет гнездовище зла, не надо будет делать в прежних количествах ракет и строить столько атомных подводных лодок. Наука наконец-то получит полновесное финансирование и начнет развиваться по законам логики и разума. Такого не произошло даже в первом приближении.

Военно-промышленный комплекс дышит на ладан, финансирование науки сократилось до смехотворно низкого уровня, образование ввиду отсутствия государственных средств стало ущербно платным, зато при наличии денег практически всеобщим. Это у нас в стране. А что же на остальном земном пространстве? Как уверяли младоидеологи, сразу после возникновения однополярного мира он вздохнет свободно.

Не надо будет никому противостоять, автоматически появится заботливый старший брат или папа, кому как больше нравится, и человечество будет иметь возможность задуматься над своими среднесрочными и долгосрочными перспективами и направить усилия всех наций на создание гармонии с природой для безбедного и длительного сосуществования с ней. В газетах писали, что всех научат ловить рыбу и все будут сыты и счастливы. Но и этого не произошло.

Страх перед СССР в умах обывателей уступил место страху перед мировым терроризмом, борьба с которым стала основой национальных политик экономически развитых государств. Противостояние продолжается. Основные усилия направляются опять-таки не на благоустройство общего человеческого дома, а на присоединение его престижных площадей.

В странах с огромным военно-промышленным потенциалом, как показывает опыт новейшей истории, при мгновенном исчезновении его прежней необходимости развитие событий протекало по двум разным схемам. В России материальные ценности ВПК попросту поделили между собой те, кто ближе всего к ним находился. США свой ВПК переориентировали на «борьбу с терроризмом» и совершенно нахальное распространение своих демократических ценностей на территории стран, обладающих стратегическими запасами сырья, интенсифицировав заодно процесс мировой глобализации.

На редкость удачным, на наш взгляд, является шутливое определение глобализации М.Г. Делягина: «Это когда английская принцесса со своим арабским любовником на немецкой машине с датским мотором и испанским водителем, опившимся шотландского виски гибнет в Париже, спасаясь от итальянских папарацци». Это определение, может быть, и не столь академично, но суть понятия схвачена в нем верно.

Подчинение посредством возможностей мировых телекоммуникационных систем сознания человеческих сообществ и отдельных личностей единым политическим и экономическим идеям может представляться как новый прогрессивный этап эволюции только в том случае, если все эти манипуляции с общественным сознанием производятся с целью обеспечения оптимального функционирования мировой науки и экономики. Если же глобализация реализуется под эгидой обеспечения экономических интересов нескольких избранных стран, то финал предскажем, и он будет вопиюще негативным.

Наука, политика и экономика США – главного идеолога и куратора глобализации – изначально ориентированы не на обеспечение мировой стабильности, а на получение прибылей, причем достаточно узким кругом лиц. При таком подходе идея миро-

вого порядка, эксплуатируемая предшествующими монархическими державами, в частности и царской Россией, заменена идеей подавления национальных конкурентоспособных производств и технологий. Доминирование науки, идеологии и экономики США над всеми остальными не представляется устойчивым в долгосрочной перспективе. Подтверждениями такому предположению может служить противостояние Европейскому союзу и исламскому миру.

Но не все в этом мире так безрадостно. Оптимизм вызывает, например, открытое совсем недавно при исследовании человеческого мозга его свойство вырабатывать особые вещества – эндорфины, вызывающие чувство огромного эмоционального подъема и удовольствия.

Эндорфины вырабатываются мозгом только в процессе творческой деятельности, когда человек на основе имеющейся в его распоряжении информации, на основе ее осмысления получает какие-то новые, неизвестные до него результаты. Это вселяет надежду на то, что, несмотря на сегодняшнее, мягко говоря, незавидное положение фундаментальной науки и образования, природная человеческая любознательность и стремление к познанию объективных истин, в конечном счете, приведут к глобальному пересмотру отношений с природой.

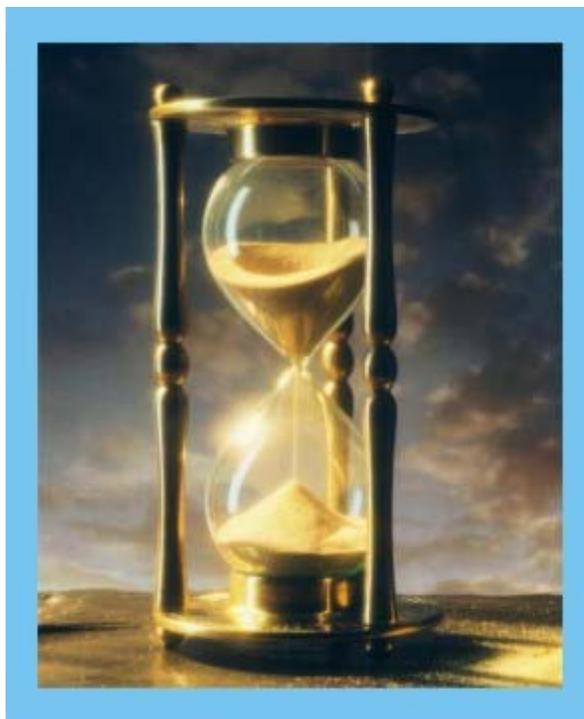
А что касается сегодняшней России с ее искусственно приниженой ролью на мировой арене, то это не первый случай. Были ситуации и пострашнее. Взять хотя бы Отечественную войну 1812 г. или Великую Отечественную войну 1940–1945 гг. Когда началась Великая Отечественная война, мало кто в мире думал, что СССР устоит, ведь вся Европа легла под Гитлера. Держались только англичане, но это было делом времени.

Однако вопреки мировой логике – победили. Значит, есть у русского народа некие потенциальные силы, способные активизироваться в лихую годину. Главное – не позволить разрушить нашу систему образования, не развалить наши передовые, даже теперь, научные школы, на создание которых ушли столетия, сохранить преемственность научных поколений. Если такого не допустим, то вероятность выхода из кризиса будет существенно отличной от нуля.

И наша генная память. Мы являемся наследниками Великой цивилизации Древних Славян. С такой уникально древней историей и с таким духовно-генетическим потенциалом невозможно длительное время находиться в состоянии стагнации. Здоровые силы нашей нации просто обязаны вспомнить о своей исторической миссии и стать новым локомотивом современной цивилизации.

Концепции современного естествознания

**Методические указания к контрольным и
индивидуальным заданиям для студентов, обу-
чающихся на экономических специальностях
университета**



УДК 50(075.8)
ББК 20я73
И85

Исаков А. Я.

И85

Концепции современного естествознания.

Электронная версия методических указаний и заданий к контрольным и индивидуальным работам по дисциплине «Концепции современного естествознания» для студентов, обучающихся на экономических специальностях КамчатГТУ. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 2012. – 21 с.

Методические указания предназначены для студентов экономических специальностей университета, изучающих в соответствии с учебными планами дисциплину «Концепции современного естествознания».

Настоящие указания соответствуют Государственным образовательным стандартам экономических специальностей университета, и рабочим программам курса, для обычной, сокращённой формы очного и заочного образования.

Методические указания содержат некоторые полезные советы по оформлению индивидуальных и контрольных работ, примеры построения ответов, варианты заданий, список рекомендуемой литературы.

УДК 50(075.8)
ББК 20я73

© КамчатГТУ, 2012

Оглавление

1. Вводные замечания	3
2. Методические рекомендации	3
3. Примеры оформления ответов	4
4. Таблица для выбора вариантов	11
5. Содержание работы	14
6. Список основной литературы	21

1. Вводные замечания

Дисциплина «Концепции современного естествознания», предусмотренная Государственными образовательными стандартами последнего поколения предусматривает изучение следующих тем: естественнонаучная и гуманитарная культуры; научный метод; история естествознания; панорама современного естествознания; тенденции развития; корпускулярная и континуальная концепции описания природы; порядок и беспорядок в природе; хаос; структурные уровни организации материи; микро-, макро- и мегамиры; пространство, время; принципы относительности; принципы симметрии; законы сохранения; взаимодействие; близкодействие, дальнодействие; состояние; принципы суперпозиции, неопределенности, дополненности; динамические и статистические закономерности в природе; законы сохранения энергии в макроскопических процессах; принцип возрастания энтропии; химические процессы, реакционная способность веществ; внутреннее строение и история геологического развития земли; принципы эволюции, воспроизводства и развития живых систем; идеи методы современной космологии.

2. Методические рекомендации

2.1. Изучение дисциплины «Концепции современного естествознания» в соответствии с учебными планами, наряду с аудиторными занятиями предусмотрено время для самостоятельной работы студентов. Это время составляет в среднем 50 часов. Предлагаемые далее к выполнению индивидуальные задания содержат **десять вопросов**, раскрывающих основное содержание дисциплины в её историческом эволюционном развитии. Работа над заданием позволяет студентам закрепить знания, полученные в аудитории и сформировать собственные представления о структуре и научных основах окружающего нас мира, что представляется весьма актуальным для формирования в процессе образования активной профессиональной и жизненной позиции.

2.2. Задания построены таким образом, что, отвечая на поставленные вопросы, студенты знакомятся с основными этапами развития естествознания от древних цивилизаций до настоящего времени. Такой подход в изучении дисциплины, на наш взгляд, позволяет более полно представить и объективно оценить все возможности и проблемы человечества в постижении законов окружающего его мира.

2.3. Каждое индивидуальное задание включает 10 вопросов, перечень которых выбирается **по таблице 1**, в соответствии с сочетанием двух последних цифр шифра в зачётной книжке. Так, например, если шифр заканчивается цифрами 25, то индивидуальное задание должно содержать ответы на вопросы №10,14,22,32,43,57,66,70,82,96.

2.4. Индивидуальные задания выполняются в отдельной тетради и снабжаются титульным листом стандартного образца. Возможен компьютерный набор ответов на листах стандартного формата А – 4.

Камчатский государственный технический университет	
Индивидуальное задание по дисциплине «Концепции современного естествознания» студентки группы 12 ПИ Кошелевой Веры Павловны (шифр)	
Задание зачтено с оценкой «.....»	
Профессор кафедры физики	А.Я. Исаков
ноябрь 2012 г	

2.5. Первая страница тетради или листа в случае компьютерного набора остается свободной от записи. При необходимости она используется для замечаний и записей при собеседовании.

2.6. Ответ на каждый вопрос варианта начинается **его номером** в общем списке вопросов и дословным изложением, **без искажений и сокращений содержания**.

2.7. В конце ответа по каждому вопросу желательно привести вывод, который должен содержать чётко сформулированное мнение автора по излагаемой теме.

2.8. Оценка качества выполненного задания оценивается преподавателем в результате собеседования с автором работы в ходе, которого устанавливается степень владения материалом и авторское мнение по излагаемым в задании темам.

2.9. Зачтённые индивидуальные задания предъявляются студентами при сдаче экзамена или зачёта.

3. Пример оформления ответа

3.1. Вопросы индивидуального задания сформулированы таким образом, что ответы должны раскрывать достаточно большой по объёму материал, который необходимо изложить кратко и понятно, изложив основную суть. Приступая к оформлению ответа, после изучения материала, целесообразно составить его краткий план. Структура ответа рекомендуется следующей:

- **Введение**, в котором указывается место излагаемых сведений в общей структуре естественнонаучных знаний об окружающем нас Мире;
- **Основная часть** раскрывает суть излагаемого вопроса, основные положения, теории и гипотезы, а так же роль отдельных исследователей в их разработке. Анализируется значение рассматриваемых вопросов для современного состояния естествознания, указываются границы применимости данных знаний и их фундаментальное и прикладное значение;
- **Выводы**. Должны содержать критический анализ основной части ответа с изложением авторского мнения по рассматриваемой теме.

Пример ответа

Вопрос № хх. «**Две формы существования материи. Проблема эфира в естествознании. Открытие электромагнитных волн**».

Введение. Как известно теперь, материя существует в двух формах: в форме вещества и в форме полей. Если понятие вещества появилось, как определяющее в физике, химии, астрономии, геологии и т.д., испокон веков, то поле, как естественнонаучная категория прежде чем стать таковой претерпела целый ряд метаморфоз и откровенных заблуждений.

Введение в научную практику полевой формы материи было сопряжено с достаточно протяжёнными заблуждениями, которые, темнее менее, сыграли определённую положительную роль в описании окружающего Мира. Так, например, введение в рассмотрение теплового эфира, теплорода или флогистона

позволило сформулировать основные законы термодинамики. Представление электрических зарядов в виде особой жидкости, позволило записать некоторые, находящиеся в использовании и в настоящее время, законы электростатики. Открытие электромагнитных волн предсказанных великим английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом и обнаруженных в лаборатории гениальным экспериментатором и теоретиком, немецким исследователем Генрихом Герцем, позволило успешно решить целый ряд фундаментальных и прикладных задач, определивших пути дальнейшего развития цивилизации.

Проблема эфира в естествознании.

Проблема пустоты с давних времён занимала умы учёных, вызывая постоянно оживлённые дискуссии. Повседневный опыт на уровне наших ощущений говорит о том, что взаимодействия происходят при непосредственном контакте взаимодействующих объектов. Обобщил житейские наблюдения Аристотель, введя понятия силы тяги, силы давления и силы удара. Аристотель полагал, что брошенное тело «ведёт» среда. В пустоте взаимодействие а, следовательно, и движение не возможно, значит – пустота тоже невозможна. Довольно логично.

Идея Аристотеля о невозможности пустоты была поставлена под сомнение только в XVII веке после изобретения ртутного барометра учеником великого Галилея, Эванжелистой Торричелли (1608 – 1647). Торричелли, по сути, открыл вакуум, свойства которого потом исследовали французский математик, физик, философ и писатель Блез Паскаль (1623 – 1662) и бургомистр Магденбурга Отто фон Герике. Эксперименты показали, помимо прочего, что вакуум не проводит звук, но проводит свет.

Следующим, кто всерьёз занялся свойствами пустоты, был неутомимый Рене Декарт. Принципиально отвергая существование пустоты, он ввёл понятие эфира. Мир, по Декарту, заполнен эфиром – тонкой материей, в которой возникают вихри, способные обеспечивать взаимодействие, опять же исключительно механическим путём.

В следующем, в XVIII веке тория великого Ньютона своим блеском и величием затмила все прочие теории, показав несостоятельность по многим позициям учения Аристотеля. Ньютон был настолько популярен в Европе, что существовали даже курсы «Ньютонизм для дам». Всё что происходило в науке, оценивалось с позиций теории механического движения Ньютона. Но механика Ньютона была не всесильна.

Трудности возникли при объяснении взаимодействия на расстоянии, например гравитационного. И со светом, тоже было не совсем всё понятно. Ньютоновские корпускулы стали на долгие времена причиной переноса различных действий на расстояние. Каждое конкретное действие требовало своих корпускул. В науку пришло туманное, но романтическое понятие эфира. Так появился флогистон – некое невесомое, летучее, невидимое вещество, определяющее тепловое состояние тел. А потом стали в моде разного рода флюиды в виде теплорода, электрических флюидов Кулона и т.д. Одним словом, появление нового явления, где взаимодействие происходило без непосредственного контакта, сопровождалось введением нового сорта флюида, который помещался между взаимодействующими объектами.

Постепенно, по мере установления аналогий между явлениями, количество флюидов уменьшилось, и все их заменили одним, ещё более туманным все проникающим универсальным эфиром. Но все попытки обращения к эфиру для трактовки передачи действия на расстоянии оказались бесплодными, потому что автоматически на него переносились свойства обычной материи.

К окончанию XIX века уже было установлена непрерывность пространства, было ясно, что в каждой точке любая физическая величина имеет вполне определённое значение, причём переход от точки к точке носит непрерывный и плавный характер. Эфир постепенно вытеснялся более прагматичным понятием поля.

Образом поля в различных отделах физики, в принципе, начали пользоваться со второй половины XIX века. Например, при объяснении явлений электрического и магнитного свойства.

Настоятельная необходимость введения понятия поля появилась после того, как датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777 – 1851) совершенно случайно в 1820 г., поместил магнитную стрелку около проводника с током и обнаружил, к своему великому удивлению, что стрелка перестала реагировать на магнитное поле Земли, а «переключилась» на проводник. В этом же году Ампер разработал теорию связи электричества и магнетизма, используя понятие поля.

В 1840 г. Майкл Фарадей в своих лекциях говорит о попытках «открыть прямую связь между светом и электричеством».

Такую связь Фарадей установил, наблюдая на опыте вращение плоскости поляризации в магнитном поле. Фарадей (1791 - 1867) на основе экспериментальных исследований сформулировал идеи поля как новой формы материи, введя понятие силовых линий.

Открытие электромагнитных волн

Эстафету формирования законов электромагнитного поля продолжил Джеймс Клерк Максвелл, записав идеи Фарадея в виде знаменитых уравнений. Революционное значение уравнений Максвелла состояло в том, что они предсказывали существование электромагнитных волн, которые были обнаружены опытным путём в 1888 г. Генрихом Герцем. Анализируя уравнения, Максвелл обнаружил, что взаимосвязанные изменения электрических и магнитных полей, в конечном счете, должны были приводить к появлению волны даже в абсолютно пустом пространстве.

Эта идея была настолько нетрадиционна, что противников у неё было гораздо больше, нежели сторонников, как среди учёных академического толка, так и среди инженеров. Дело в том, что понятие волн в то время обязательно связывалось с наличием среды, в которой волны распространяются.

Житейские наблюдения говорили о том же: волны на поверхности жидкости, волны на полях, засеянных злаками, упругие волны в газах, жидкостях и твёрдых телах и т.д. Когда же со средой возникали трудности и недоразумения её, как отмечено выше, заполняли разного рода эфирами, обладающими свойствами, необходимыми для существования данной теории. А волна в пустом пространстве, помимо всех прочих странностей, ещё и не должна затухать, тут явно пахло нарушением законов сохранения в механическом их толковании.

Работая над своими уравнениями Максвелл не подозревал, что в Королевском научном обществе хранится с 1832 г. запечатанный конверт, который велено открыть и сделать достоянием общества через 106 лет (!?). Текст послания, составленного загадочным Майклом Фарадеем и зачитанным только в 1938 г. потряс до возможного предела сдержанных английских учёных и их зарубежных коллег. Фарадей завещал: « Я пришёл к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, окажется весьма незначительным. Я полагаю, что электромагнитная индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности. По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электромагнитной индукции. В настоящее время, насколько это мне известно, никто из учёных не имеет подобных взглядов».

Конверт был запечатан Майклом Фарадеем, когда Максвеллу был всего год от роду. Сейчас трудно представить себе причины, по которым Фарадей не опубликовал столь гениальную догадку. Толи боязнь быть не понятым, а возможно осознание преждевременности своей идеи. Ясно одно, со сроками созревания научной мысли Фарадей явно просчитался. Потребовалось существенно менее 100 лет, чтобы удалось увидеть в электричестве и магнетизме объединяющее начало, и, как следствие этого, появление особого рода волн.

Когда Максвелл размышлял над превратностями электродинамики и обосновывал неизбежность появления электромагнитных волн, юный Генрих Герц ещё учился в школе, и не подозревал, что именно он положит конец многочисленным дискуссиям.

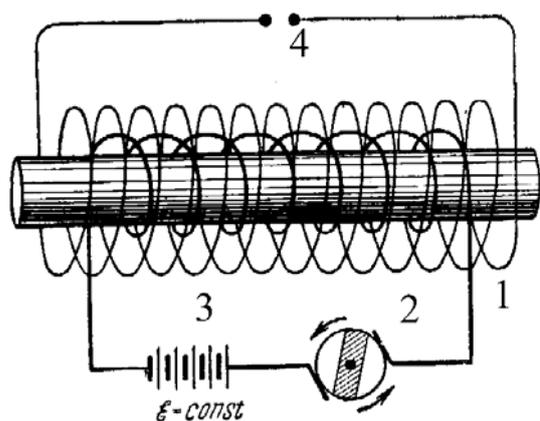
Генрих Рудольф Герц является настолько неординарной личностью в современной и классической физике, что о нём следует сказать особо и более подробно. Родился Герц в г. Гамбурге в семье адвоката. Образование Герц получил совершенно стандартное для того времени: реальное училище, городская гимназия, высшее Дрезденское техническое училище, мюнхенский университет, берлинский университет.

На всех этапах учёбы Генрих блистал и был замечен одним из самых знаменитых немецких физиков Германом Гельмгольцем (1821 - 1894), это решило дальнейшую научную судьбу способного молодого человека. Этот волевой и целенаправленный учёный с широчайшими научными интересами, что вполне типично для того времени, имел на Герца огромное влияние. Гельмгольц, не подозревая о работах Ломоносова и Майера - Джоуля, в довольно юном возрасте обосновал закон сохранения и превращения энергии, затем он не без успехов занимался физиологией (одно из образований было медицинским), но научная зрелость была посвящена теории электричества, последняя, так сказать, любовь.

Гельмгольц, пожалуй, первый обратил достойное внимание на работы Максвелла. Они производили на него неоднозначное впечатление. С одной стороны он понимал роль промежуточной среды в теории электромагнитных волн, с другой стороны, смириться с тем, что этой средой может быть «ничто» он не мог. Будучи приверженцем идей Канта, о невозможности познания мира, он исповедовал в электричестве учение о дальнодействии, несмотря на его очевидные несоответствия с реалиями. Генрих Герц всю свою короткую, но яркую

жизнь старался подтвердить научные взгляды своего учителя, но никогда не прогибался и всегда был предельно честен.

Работая в команде Гельмгольца, Герц имел все возможности проявить себя. К великому сожалению, судьба определила Герцу светлую голову и совсем никудышнее здоровье. Он родился, как в прочем и многие гении (Ньютон, Кеплер, Декарт и др.) очень слабым. Врачи без оптимизма оценивали его дальнейшие перспективы пребывания на этом Свете. Болезни буквально преследовали Герца от самого рождения и до безвременной кончины в возрасте всего 37 лет. У него болели глаза, уши, зубы. Чтобы окончательно убедить себя в невозможности распространяться какой бы то ни было субстанции в пустоте, Гельмголец поручает Генриху Герцу спланировать и провести серию экспериментов. Начинающему двадцатилетнему учёному с ещё не окрепшими научными взглядами и представлениями была поручена миссия экспериментального опровержения сэра Максвелла. Авторитет Гельмгольца был настолько велик, что у Герца по началу и в мыслях даже не было объективно во всём разобраться. Однако, чем больше Герц ставил экспериментов, тем радикальнее опровергалась теория дальнего действия и находила подтверждение там, где совпадала с представлениями опровергаемого англичанина. А признавать универсальность максвелловской теории ой как не хотелось. Во - первых, потому что теория родом из Англии, которая, как известно для немцев совсем даже не указ. Во - вторых, если признать правоту Максвелла, то нужно было, мягко говоря, переоценить значимость немецких электродинамиков, таких как Нейман, Вебер и др.



Установка Герца

Днем 14 ноября 1886 г. можно считать днём открытия (вопреки себе) электромагнитных волн. Именно в этот день, по-немецки пунктуальный, Герц записал в своём дневнике: «Посчастливилось установить индукционное действие друг на друга двух незамкнутых цепей с током. Длина цепей 3м, расстояние между ними 1,5м.»

Экспериментальная установка герца была до удивления проста и не содержала ни одного нового элемента. Всё что использовал юный гений, можно было отыскать в любой даже самой захудалой физической лаборатории того времени.

Установка состояла из индуктора Румкорфа 1, представляющего собой в современном понимании, повышающий трансформатор, у которого обе обмотки расположены на одном незамкнутом цилиндрическом сердечнике. В цепи первичной обмотки включался источник ЭДС 3 и механический прерыватель 2, в виде диэлектрического вращающегося диска с проводящей вставкой и двумя радиальными контактами. Вторичная обмотка соединялась с разрядниками 4, между которыми проскакивала искра во время размыкания контактов в цепи первичной обмотки. Идея использования механического прерывателя для получения импульсов напряжения довольно значительной величины (несколь-

ко киловольт) используется в современных карбюраторных двигателях внутреннего сгорания.

Недалеко от разрядников 4 Герц разместил ещё пару разрядников, соединённых с проволочным контуром. Проводя эксперимент в тёмной комнате, Герц обнаружил искрение между разрядниками. Это означало, что электрический импульс был передан на расстояние около полутора метров совершенно без проводов. Вопреки первоначальным установкам Гельмгольца, всё шло к тому, что англичанин прав - волны существуют.

В ходе дальнейших захватывающих экспериментов Герцу удалось установить, что предсказанные Максвеллом волны экранируются стальным листом, а фанерные и деревянные препятствия для них не являются преградой.

Обнаруженные Герцем искровые волны в явном виде демонстрировали свойства аналогичные свету. Посчитав приближённо скорость распространения исследуемых волн, Герц убедился, что и тут Максвелл прав - волны распространялись со скоростью очень близкой к скорости света. Чтобы окончательно убедить себя, а особенно, своего учителя, в том что он имеет дело именно с волнами, Герц ставит эксперимент с преломлением на асфальтовой призме весом около двух тонн. Поместив призму между излучателем и приёмником, он обнаруживает отклонение от прямолинейного распространения.

Заключение. Для учёных естествоиспытателей, результаты этих экспериментов, прежде всего, означали полный триумф уравнений Максвелла и забвение всех других электродинамических теорий. Все неисчислимо бумажное многопудье курсов электродинамики Неймана, Вебера, Гельмгольца и множества других авторов нашло свою гавань в пыльных архивах науки, уступив место нескольким строкам максвелловских уравнений». Следует, однако, отметить, что появление теории стало возможным благодаря предшественникам, заложивших основы знаний об электромагнетизме. Открытие электромагнитных волн сделало неизбежным появление корпускулярно-волнового дуализма и многих приложений, таких как радио и телевидение.

4. Варианты индивидуальных заданий

Таблица 1

		Б ⇒ Последняя цифра номера шифра по зачётной книжке									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	Предпоследняя цифра номера шифра по зачётной книжке	10	9	4	5	3	2	1	8	7	6
		14	15	20	16	17	18	19	11	12	13
		22	21	26	27	28	29	30	25	24	23
		37	38	31	32	33	40	39	34	35	36
		42	41	48	49	50	47	46	43	44	45
		60	59	54	53	55	52	51	58	57	56
		69	68	67	66	65	64	94	62	61	60
		77	76	75	79	70	72	87	73	74	76
		83	82	81	80	89	88	71	86	85	84
		100	99	98	97	96	95	63	93	92	91
1		1	2	3	4	6	7	8	9	10	5
		17	18	19	20	15	14	13	12	11	16
		22	23	30	29	24	25	26	27	23	21
		39	40	37	36	33	34	35	32	31	38
		50	48	47	46	43	42	41	45	44	49
		54	55	52	51	58	59	60	57	56	53
		65	64	63	62	61	60	66	67	68	69
		70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
		89	88	87	86	85	84	83	82	81	80
95	94	93	92	91	90	99	98	97	96		
2		2	1	5	4	9	10	6	7	8	3
		18	20	17	16	19	14	15	12	11	13
		30	28	27	26	23	22	21	26	24	29
		36	37	38	39	31	32	33	34	35	40
		47	48	49	50	44	43	42	41	46	40
		51	52	53	54	56	57	58	59	60	55
		61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
		79	78	77	76	75	70	71	72	73	74
		85	86	87	88	81	82	83	84	90	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100		
3		3	4	5	10	9	8	7	6	1	2
		13	20	19	14	15	16	17	18	11	12
		30	27	26	23	24	25	22	21	28	29
		38	37	36	33	32	31	35	34	39	40
		47	48	49	41	42	43	44	45	50	46
		53	54	55	60	59	58	57	56	51	52
		70	62	63	64	65	66	67	68	69	69
		79	78	77	76	75	74	73	72	70	71
		81	83	85	87	89	82	84	86	88	80
98	96	94	92	100	95	95	93	91	90		

		Б ⇒ Последняя цифра номера шифра по зачётной книжке									
Предпоследняя цифра номера шифра по зачётной книжке	4	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		4	5	2	1	8	9	10	7	6	3
		20	18	17	16	13	12	11	15	14	19
		26	27	28	29	21	22	23	24	25	30
		37	38	39	40	35	34	33	32	31	36
		42	43	50	49	44	45	46	47	48	41
		52	51	55	59	60	56	58	57	56	53
		66	65	64	63	62	61	67	68	69	70
		79	78	77	76	70	71	72	73	74	75
		81	82	83	85	84	87	86	89	88	90
	96	91	92	93	94	95	100	99	98	97	
	5	10	9	4	5	3	2	1	6	7	8
		14	15	20	16	17	18	19	11	12	13
		22	21	26	27	28	29	30	25	24	23
		37	38	31	32	33	40	39	34	35	36
		42	41	48	49	50	47	46	43	44	45
		60	59	54	55	53	52	51	58	51	56
		69	68	67	66	65	64	94	62	61	60
		77	76	75	79	70	72	87	73	74	76
		83	82	81	80	89	88	71	86	85	84
		100	99	98	97	96	95	63	93	92	91
	6	5	3	7	6	4	3	2	10	1	9
		12	20	13	14	16	17	15	18	19	11
		28	27	30	26	24	25	23	22	21	29
		32	33	34	40	35	36	37	38	32	31
		41	42	43	44	46	47	48	45	49	50
		60	58	59	57	51	52	53	54	55	56
		65	64	63	62	61	60	66	67	68	69
		70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
		89	88	87	86	85	84	83	82	81	80
		95	94	93	92	91	90	99	98	97	96
	7	7	10	5	2	1	3	9	4	8	6
		16	17	18	20	19	13	12	11	16	14
26		27	21	22	30	23	24	29	28	25	
31		38	39	34	37	40	33	36	35	32	
42		41	46	47	48	49	50	45	44	43	
55		58	56	54	53	52	60	51	59	57	
68		69	62	65	63	64	70	66	67	61	
79		71	72	73	74	75	76	77	78	70	
89		87	85	83	81	88	86	84	82	80	
100		98	96	94	92	97	95	93	91	99	

		Б ⇒ Последняя цифра номера шифра по зачётной книжке									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А ⇒ Предпоследняя цифра шифра	8	8	4	9	3	2	1	5	10	6	7
		18	15	20	11	12	15	14	19	17	16
		25	22	28	30	29	27	26	24	23	21
		38	30	31	32	40	33	34	36	37	35
		43	42	49	48	47	50	46	44	45	41
		56	54	53	51	55	52	57	60	58	59
		68	67	60	66	63	62	61	69	64	65
		72	73	74	80	75	76	77	78	72	71
		81	82	83	84	86	87	89	85	90	88
		99	98	93	94	92	91	96	97	100	95
9	9	8	3	4	5	2	1	6	7	10	
	13	12	17	18	19	20	16	11	15	14	
	23	24	26	27	28	29	30	25	21	22	
	31	35	40	39	38	37	36	34	33	32	
	45	44	49	50	47	48	46	41	42	43	
	57	60	55	59	52	53	55	58	53	51	
	69	70	67	66	68	65	64	63	62	61	
	76	78	77	79	71	72	73	74	75	70	
	87	88	89	90	85	84	83	82	81	86	
	91	92	93	94	96	97	99	100	95	98	

5. Содержание индивидуального задания

1. Основная движущая сила развития современной цивилизации. История возникновения естественнонаучных знаний об окружающем мире. Научно-технические загадки древних цивилизаций. Отличие человека от других живых существ. Виды и основные характеристики эволюционного процесса.

2. Естественнонаучные аспекты возникновения древних цивилизаций. Особенности временной зависимости суммарных знаний человечества. Энергетическая основа возникновения цивилизованных отношений. Сравнительные энергетические особенности ближневосточных южных и северных территорий.

3. Естественнонаучные аспекты цивилизации северных широт. Археологические находки, подтверждающие древность северной цивилизации. Цивилизация верхнего палеолита.

4. Гипотеза о распространении цивилизации протославян. Древняя славянская письменность. Велесова книга. Руническое письмо. Памятники рунического письма.

5. Мировосприятие Древних Славян. Эзотерические Миры Древних Славян. Принцип вращения энергии в славянской мифологии. Естественнонаучные основы Юджизма. Три уровня восприятия Мира.

6. Естественнонаучные аспекты религии Древних Славян. Альтернативные теории эволюции. Астрологические воззрения Древних Славян. Цифры жизни.

7. Математические знания Древних Славян. χ Арийская арифметика. Пядевая и метрическая системы масштабных единиц.

8. Военные технологии Древних Славян. Киммерийцы, Скифы, Сарматы. Основные показатели уровня развития науки, техники и культуры древних цивилизаций.

9. Транспортные средства Древних Славян. Данные ДНК-генеологии. Особенности распространения рода R1a1. Приручение лошади и особенности её распространения. Тарпаны и лошадь Прежевальского. Конные войска Древних Славян.

10. Технологии Древних Славян. Эпохи меди, бронзы и железа. Золотые технологии скифов.

11. Технологии северных славян («викингов»). Северные славяне и Европа. Вооружение северных славян. Морские и судостроительные технологии северных славян. Боевые суда северных славян. Дракары.
12. Аркаим. История археологической находки. Научно технический потенциал Аркаима. Гипотезы предназначения: производственная, военная, астрономическая.
13. Медицина Древних Славян. Славянские заповеди о здоровье. Использование природных средств в древней славянской медицине.
14. Естественнонаучные достижения Древнего Китая. Великие изобретения Древнего Китая. Письменность и астрономические знания Древнего Китая. Математика Древнего Китая.
15. Физико-технические достижения Древнего Китая. Магнитные указатели и компасы. Судостроительные технологии. Звёздные карты. Медицина Древнего Китая.
16. Технологии Древнего Китая. Измеритель пути. Измерители времени. Биологический контроль. Огненные часы. Фарфор. Компас. Порох. Воздушные змеи.
17. Естественнонаучные достижения цивилизаций Древней Месопотамии (Шумер, Вавилон, Ассирия). Письменность Двуречья. Математика, астрономия, медицина. Строительные технологии. Принципы и методы культурного земледелия.
18. Естественнонаучные достижения Древнего Египта. Пирамиды: история строительства, методы возведения, гипотезы о предназначении.
19. Зарождение теоретического базиса естествознания в Древней Греции. Naturфилософы Древней Греции: Фалес Милетский, Анаксимандр, Анаксимен, Анаксагор.
20. Возникновение и развитие фундаментальных знаний в Древней Греции: Демокрит, Пифагор и его последователи, Аристотель, Архимед, Клавдий Птолемей, Гиппократ.
21. Военные технологии древних цивилизаций. Лук и стрелы. Станковое метательное оружие.
22. Метательные машины. Принцип действия, технические характеристики, основные типы.
23. Техника античности. Гномоны и клепсидры. Изобретения Филона и Герона Александрийского.

24. Морской транспорт древних цивилизаций. Древние Славяне, Древний Египет, Древний Китай, Финикия, Древняя Греция (боевые корабли).

25. Открытие основных механических принципов устройства Мира. Развитие теорий мирового устройства. Механические принципы Аристотеля.

26. Особенности счисления времени и расстояний. Кинематические характеристики движения: путь, траектория, перемещение, скорость, ускорение. Векторные и скалярные физические величины.

27. Основные типы движения: равномерное прямолинейное, Равнопеременное прямолинейное, Движение тела, брошенного под углом к горизонту, Вращательное движение.

28. Возникновение и развитие динамики. Механика Леонардо да Винчи. Становление небесной механики. Теория Николоса Коперника. Тихо Браге. Иоган Кеплер.

29. Механические воззрения Галилео Галилея. Физические эксперименты Галилея. Принцип относительности Галилея. Галилей и Аристотель.

30. Механика Ньютона. Законы механики Ньютона и их следствия. Значение законов механики ньютона для развития естествознания от времен Эпохи Возрождения до нынешних дней.

31. Закон сохранения энергии. Работа сил в классической механике. Виды механической энергии и универсальные свойства их взаимосвязи.

32. Распространение закона сохранения механической энергии на смежные области знаний. Алхимия и PERPENUUM MOBILE.

33. Механические принципы построения вечных двигателей. Причины невозможности построения машин с вечным движением.

34. Внешние и внутренние силы. Главные вектор и главный момент внутренних сил в свете построения вечных двигателей гидравлического принципа действия.

35. Структура вещества. Творцы новых теорий. Демокрит, Левкипп, Аристотель, Ломоносов, Лавуазье, Броун, Менделеев, Клапейрон, Максвелл, Гей-Люссак. Понятие молекул и атомов.

36. Состояние и параметры вещества: Твёрдое, жидкое, газообразное, плазма. Основные характеристики состояний и условия трансформации

37. Атомы и молекулы. Основные физические характеристики молекулярного строения вещества. Молярная масса веществ. Уравнение состояния.

38. Фундаментальный смысл температуры. Первые измерители температуры. Термометры и термоскопы Галилея.
37. Температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Кельвина. Физический смысл температурных шкал.
38. Открытие атмосферного давления. Опыт Торричелли. Полушария Герике. Соотношение между температурными шкалами.
39. Элементы молекулярно-кинетической теории. Броуновское движение. Уравнение состояния идеального газа.
40. Возникновение термодинамических представлений. Сади Карно, Роберт Мейер, Джеймс Джоуль, Герман Гельмгольц. Закон сохранения энергии.
41. Механический эквивалент тепла. Опыт Джоуля, установка Грина. Понятия температуры и количества тепла.
42. Первое и второе начало термодинамики. Работа в термодинамике. Развитие теоретических представлений о температуре и количестве тепла.
43. Внутренняя энергия вещества. Возможности преобразования внутренней энергии в механическую работу.
44. Принцип действия тепловых машин. Типы круговых термодинамических процессов.
45. Цикл Карно. Постулат Карно о величине механической работы тепловой машины. Коэффициент полезного действия тепловых машин.
46. Понятие энтропии как элемента взаимосвязи между температурой и количеством тепла.
47. Закон возрастания энтропии. Гипотеза о тепловой смерти Вселенной.
48. Первые опыты построения тепловых машин. Христиан Гюйгенс. Денни Папен, Ньюкомен.
48. Тепловые машины Ползунова и Уатта. Принцип действия, устройство, коэффициент полезного действия.
49. История развития самодвижущихся экипажей с позиций использования различных энергетических источников: мускульная сила, сила ветра и воды, сила пара. Сравнительный анализ эффективности.
50. Первые паровые самодвижущиеся экипажи. Паровые турбины, телега Кюньо, паровик Уильяма Мердока, экипаж Тревитика.

51. Паровые автомобили. Конструкции Серполе, четырёхколёсные и двухколёсные экипажи. Эволюция паромобилей. Технические характеристики. Достоинства и недостатки.

52. Паровозы. Локомотивы Стефансона. Паровики Черепановых. Развитие зарубежного и отечественного железнодорожного транспорта.

53. Основные этапы развития отечественного паровозостроения.

54. Внедрение энергетических возможностей пара на морском транспорте. Пароходы Фултона.

55. Исторические аспекты изобретения турбины. Эолепид Герона, водяные колёса Древнего Китая, водяные и ветряные мельницы, паровые турбины.

56. Сопло Лавалья и турбины Парсонса. Применение турбин на судах и в авиации. Сравнительный анализ энергетических возможностей.

57. Применение турбонаддува в автомобильном транспорте. Принцип действия, причины повышения эффективности ДВС с турбонаддувом

58. История создания двигателей внутреннего сгорания. Лебон, Ленуар, Отто, Даймлер и Майбах. Физические и химические принципы, положенные в основу функционирования ДВС.

59. Принцип действия четырёхтактных двигателей внутреннего сгорания. Перспективы повышения эффективности.

60. Принцип действия двухтактных двигателей внутреннего сгорания. Сравнительные характеристики с четырёхтактными двигателями.

61. Эволюция автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Причины невозможности радикального увеличения коэффициента полезного действия.

62. Двигатель внутреннего сгорания Рудольфа Дизеля. Сравнительный анализ с карбюраторными двигателями принудительного зажигания топливной смеси.

63. Роторный двигатель Феликса Ванкеля. Принцип действия, устройство, перспективы. Сравнительный анализ с двигателями других конструкций.

64. Принцип и теоретические основы действия ракетных двигателей. Проявление закона сохранения импульса в ракетных двигателях. Задача о движении тел с переменной массой. Работы Циолковского и Мещерского.

65. Сравнительный анализ двигателей различной конструкции и принципов действия. Перспективы улучшения их технических и экологических характеристик. Перспективы замены углеводородных топлив.

66. Программа «Энергия – Буран». Назначение, технические возможности. Теоретические перспективы. Причины замораживания программы.
67. Мега, макро и микро уровень окружающего Мира. Фундаментальные взаимодействия. Природные проявления электрических явлений и эффектов.
68. Гравитационный закон Ньютона и электростатический закон Кулона. Фундаментальная общность взаимодействия. Потенциальность гравитационных и электростатических сил.
69. Исторические особенности развития учений об электрических и магнитных явлениях. Франклин, фон Клейст, лейденские банки.
70. Луиджи Гальвани и Алесандро Вольта. Начальные теории электричества. Значение изобретения вольтова столба в развитии теории электромагнитных явлений
71. Устройство и принцип действия первых химических источников электрического тока. Явления, сопровождающие прохождение электрического тока через среды.
72. Исторические особенности открытия, исследования и использования природных магнитов и магнитных явлений. Указатели направления, компасы. Природные магниты.
73. Исследования и теории Эрстеда, Ампера, Фарадея в области электрических и магнитных явлений.
74. Элементарный электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Фундаментальное значение закона.
75. Дискретность электрического заряда. Исследования Томсона, Милликена и Максвелла.
76. Закон Кулона. Принцип суперпозиции электрических полей.
77. Напряжённость электрического поля. Способность электрических полей совершать работу. Потенциальность электрического поля.
78. Накопители электрической энергии. Применение конденсаторов в современных технологиях.
79. Основные законы направленного движения электрических зарядов. Сила тока, плотность тока. Тепловая и дрейфовая скорость носителей заряда. Законы постоянного тока. Работа и мощность электрического тока.

80. Химические источники постоянного тока. Эффективность работы источников тока в цепях постоянного тока. Устройство современных источников.

81. Магнитное поле движущихся зарядов. Проявление сил Кулона и Лоренца. Закон Ампера.

82. Закон электромагнитной индукции Майкла Фарадея. Фундаментальное и прикладное значение закона электромагнитной индукции.

83. Электродинамика Максвелла – Герца – Хевисайда. Основной физический смысл уравнений. Фундаментальная и практическая значимость. Скорость распространения электромагнитной энергии

84. Электромагнитные волны. Предсказание и открытие. Опыты Генриха Герца. Отличия электромагнитных и упругих волн. Скорость распространения, энергетические возможности.

85. Излучение и приём электромагнитных волн. А.С. Попов и Г. Маркони. Устройство и принцип действия первых приёмников и передатчиков электромагнитных волн.

86. Теории Демокрита, Дальтона, Ломоносова, Фарадея, Гейслера, Крукса, Томсона, Милликена и Рентгена в области структурного строения материи.

87. Первые модели атома Томсона и Резерфорда. Опыты Резерфорда с α – частицами. Открытие атомного ядра.

88. Открытие явления радиоактивности. Исследования Анри Беккереля и супругов Кюри. Основные энергетические характеристики радиоактивности, α , β распад и γ – излучение.

89. Элементы квантовой механики. Фотоэффект и излучение абсолютно чёрного тела. Трудности классической физики. Поглощение и излучение атомами электромагнитной энергии.

90. Квантовая модель атома. Трудности планетарной модели Резерфорда. Структура электронных оболочек. Корпускулярно – волновой дуализм. Волны де Бройля.

91. Структура и свойства атомных ядер. Протоны и нейтроны. Заряды и массы протонов и электронов. Гипотезы о несоответствии.

92. Естественные и искусственные ядерные превращения. Правило радиоактивного смещения. Закон радиоактивного распада.

93. Энергетические возможности ядерного распада. Сравнительные оценки. Трансформация массы в энергию. Возможности практического применения.

94. Управляемые и неуправляемые ядерные реакции. Атомные реакторы и атомные бомбы. Электрические станции, транспортные силовые установки. Биологическое действие радиоактивного излучения.

95. Состояние и перспективы атомной энергетики. Технические и экологические особенности эксплуатации атомных источников энергии.

96. Атомное и ядерное оружие. История создания, основные этапы развития, состояние и перспективы. Отечественные и иностранные разработки.

97. Основные физические характеристики Солнца. Гипотезы о механизме возникновения солнечной энергии. Влияние состояния звезды на возникновение, развитие и поддержание жизни на Земле.

98. Строение, структура и основные физические характеристики планеты Земля. Эволюционные процессы. Взаимодействие атмосферы и океана. Гипотезы о происхождении воды. Аномальные свойства воды.

99. Феномен жизни. Космические предпосылки. Основные гипотезы о происхождении жизни на Земле. Гипотезы о происхождении человека.

100. Сравнительный анализ различных энергетических источников, используемых человеком. Технологические, экономические, экологические перспективы и угрозы.

Рекомендуемая литература

1. Исаков А.Я. Основы современного естествознания. Ч. 1. Древние цивилизации. Античный период. Эпоха возрождения: Учебно-методическое пособие. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 302 с.

2. Исаков А.Я. Основы современного естествознания. Ч. 2: Классический период естествознания. Учебно-методическое пособие. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 274 с.

3. Исаков А.Я. Основы современного естествознания. Ч. 3. Естествознание Нового времени: Учебно-методическое пособие. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 336 с.

5. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. Учебник под ред. акад. РАН М.Ф. Жукова. – Новосибирск. ООО «Издательство ЮКЭА», 1997 с.

<http://vipbook.info/nauka-i-ucheba/voyna/33217-ayaisakov-yenergiya-v-3-x-chastyah.html>

<http://fizmatbank.ru/list.php?c=lib>

<http://domaknig.net/6421-ayaisakov-energiya-v-3-h-chastyah.html>

<http://www.alleng.ru/d/natur/nat036.htm>

<http://www.alleng.ru/edu/phys9.htm>

<http://science.kamchatgtu.ru/a.%20исаков%20физика/>

<http://science.kamchatgtu.ru/a.%20исаков%20энергия%20войны/>

<http://science.kamchatgtu.ru/a.%20исаков%20концепции%20современного%20естествознания/>