

**В. В. Суриков**

# **ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ: ФИЗИКА**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СПО**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебного пособия для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2019**

УДК 50  
ББК 20  
С90

**Автор:**

**Суриков Виктор Васильевич** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

**Рецензенты:**

*Белов К. П.* — доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, лауреат Государственной премии СССР;

*Стеценко П. Н.* — доктор физико-математических наук, заслуженный профессор Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

**Суриков, В. В.**

С90 Естествознание: физика : учеб. пособие для СПО / В. В. Суриков. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 143 с. — (Серия : Профессиональное образование).

ISBN 978-5-534-06437-7

Учебное пособие, написанное доктором физико-математических наук, профессором физического факультета МГУ В. В. Суриковым, посвящено глобальным проблемам современности и физическим основам естествознания. При написании особое внимание обращалось на доступность изложения.

Содержание учебного пособия соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

*Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, преподавателей и всех интересующихся.*

УДК 50  
ББК 20



Delphi Law Company

*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

ISBN 978-5-534-06437-7

© Суриков В. В., 2014  
© Суриков В. В., 2017, с изменениями  
© ООО «Издательство Юрайт», 2019



# Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	<b>6</b>
<b>Введение</b> .....	<b>7</b>
<b>Глава 1. Глобальные проблемы современности</b> .....	<b>9</b>
1.1. Анализ и синтез. Цель естествознания .....	9
1.2. Биосфера и принципиальная трудность при ее исследовании.....	10
1.3. Тревожные факты и тенденции .....	11
1.4. Мысленные модели .....	14
1.5. Компьютерные модели .....	16
1.6. Пределы роста .....	17
1.7. Ограничивающие факторы.....	19
1.8. О влиянии научно-технического прогресса на основные тенденции глобального развития .....	22
1.9. Многоуровневая компьютерная модель.....	23
1.10. Устойчивость биосферы. Бифуркация .....	24
1.11. Термодинамика и молекулярная физика.....	26
1.12. Первое начало термодинамики .....	27
1.13. Идеальная тепловая машина и ее коэффициент полезного действия.....	29
1.14. Второе начало термодинамики.....	31
1.15. Энтропия.....	31
1.16. О тепловой смерти Вселенной .....	34
1.17. Энтропия биосферы.....	35
1.18. О принципиальной возможности выхода из кризиса .....	39
1.19. Предел антропогенного воздействия на биосферу .....	40
1.20. Тенденции сегодняшнего дня .....	41
1.21. Плутоний .....	46
1.22. Генетически модифицированные продукты .....	47
1.23. Современные глобальные прогнозы.....	48
1.24. Homo sapiens или ...?.....	54
1.25. О переходе к устойчивой системе.....	54
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	57
<i>Список использованной литературы</i> .....	58
<b>Глава 2. Физические основы естествознания</b> .....	<b>59</b>
2.1. Естественнонаучная картина мира. Вселенная. Метагалактика. Галактика .....	59
2.2. Звезды. Солнце .....	62

2.3. Фундаментальные взаимодействия в природе.....	63
2.4. Границы применимости классической физики .....	64
2.5. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета .....	64
2.6. Второй закон Ньютона.....	65
2.7. Третий закон Ньютона .....	66
2.8. Закон всемирного тяготения .....	66
2.9. Закон сохранения механической энергии .....	67
2.10. Закон сохранения импульса.....	68
2.11. Закон сохранения момента импульса.....	69
2.12. Движение центра масс .....	72
2.13. Принцип относительности Галилея.....	73
2.14. Механика твердого тела .....	74
2.15. Момент инерции твердого тела .....	77
2.16. Колебания и волны.....	79
2.17. Звуковые волны .....	81
2.18. Электрический заряд. Закон Кулона.....	85
2.19. Напряженность электрического поля.....	86
2.20. Потенциал и разность потенциалов .....	87
2.21. Теорема Гаусса.....	88
2.22. Проводники в электростатическом поле.....	89
2.23. Емкость.....	90
2.24. Диэлектрики в электростатическом поле .....	92
2.25. Постоянный электрический ток .....	94
2.26. Магнитное поле. Современные представления о природе магнитных взаимодействий.....	99
2.27. Основные законы магнетизма .....	102
2.28. Поток и циркуляция вектора $B$ .....	104
2.29. Электромагнитная индукция.....	105
2.30. Энергия магнитного поля контура с током.....	106
2.31. Намагничивание вещества .....	107
2.32. Простейшая классификация магнитных веществ.....	108
2.33. Магнитное поле Земли.....	111
2.34. Переменный электрический ток. Закон Ома .....	112
2.35. Основные положения теории Максвелла .....	115
2.36. Электромагнитные волны .....	117
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	118
<b>Глава 3. Физика XX века .....</b>	<b>120</b>
3.1. Элементы специальной теории относительности.....	120
3.2. Строение атома .....	124
3.3. Гипотеза де Бройля .....	125
3.4. Соотношение неопределенностей Гейзенберга .....	126
3.5. Уравнение Шредингера. Волновая функция .....	127
3.6. Квантование энергии.....	128
3.7. Вынужденное излучение .....	130

3.8. Принцип действия лазера .....	131
3.9. Состав атомного ядра.....	133
3.10. Энергия связи ядра атома .....	134
3.11. Деление ядер.....	135
3.12. Термоядерный синтез.....	137
3.13. Некоторые перспективы .....	138
<i>Контрольные вопросы и задания.....</i>	<i>138</i>
<i>Список использованной литературы к главам 2 и 3.....</i>	<i>139</i>
<b>Список рекомендуемой литературы.....</b>	<b>140</b>
<b>Новые издания по дисциплине «Естествознание: физика» и смежным дисциплинам .....</b>	<b>141</b>
<b>Концептуальная программа курса «Основы естествознания и глобальные проблемы» .....</b>	<b>142</b>

## Предисловие

Книга написана на основе курса лекций, читаемого с 1994 г. студентам экономического факультета, а с 2012 г. и студентам факультета глобальных процессов МГУ им. М. В. Ломоносова. Сделана попытка разработать предельно краткий, односеместровый курс естествознания, отражающий суть современной естественнонаучной картины мира и в то же время написанный языком, понятным студентам тех специализаций, для которых физика не является профилирующим предметом или даже вовсе отсутствует в программах.

Рассматриваются современные проблемы и достижения естествознания. Охватываются масштабы от размеров элементарных частиц до Вселенной, все виды фундаментальных взаимодействий, наиболее принципиальные законы и понятия, крупнейшие достижения науки XX в., преобразившие жизнь человечества. Особое внимание уделяется современным глобальным проблемам и проблемам сохранения биосферы.

Естествознание огромно, и физика не является основой всего естествознания. При увеличении числа часов, выделяемых на естествознание в учебных программах, расширяются возможности включения в курс крупнейших достижений биологии, химии и других естественных наук.

В результате изучения настоящего учебного пособия студент должен освоить:

### *трудовые действия*

- владение методологией естественнонаучного представления современной картины мира и принципиальных возможностей выхода из глобального кризиса;

### *необходимые умения*

- пользоваться базисными законами естествознания для решения конкретных задач и при формировании концепций мирового развития;

### *необходимые знания*

- основных физических законов, составляющих фундамент современного естествознания и естественнонаучных оценок тенденций глобального кризиса.

Учебное пособие подготовлено студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, преподавателей и всех интересующихся.

## Введение

*Естествознанием, естественными науками* обычно называют совокупность наук о природе (физика, химия, биология, геология, география и т.д.).

Физика — наука о природе, изучающая наиболее общие ее законы, поэтому физика и ее законы лежат в основе всего естествознания. Проникновение физики в другие естественные науки настолько органично и многогранно, что на стыках возникли новые естественные науки: биофизика, астрофизика, геофизика, физическая химия и т.д. Кроме того, физика предопределяет фундамент и всех технических достижений человека. Поэтому в нашем кратком вводном курсе основное внимание будет уделено наиболее важным и принципиальным достижениям современной физики.

Влияние естествознания на формирование и развитие методологии экономической науки не вызывает сомнений. Так, изучая принципы, используемые при построении и обосновании различных систем экономического знания, можно обнаружить противостояние двух основных подходов: рационализма и эмпиризма. Рационализм предлагает в качестве основного источника знания разум, а эмпиризм — чувственный опыт.

Рационализм сложился как попытка объяснить свойственные математическому знанию всеобщность и необходимость. В свою очередь, эмпиризм, утверждавший, что факты и только факты являются основой утверждений по поводу истинности или ложности знания, черпал свои идеи из физики, анатомии и других естественных наук.

В Новое время рационалистическая установка была представлена, прежде всего, классической политической экономией, согласно которой экономика, как и мир в целом, устроены разумно, и человек способен познать их законы. Но у родоначальников экономической теории рационализм не ограничивался построением только мыслительных конструкций на основе всеобщих и необходимых принципов, но и предполагал использование эмпирических методов, прежде всего эксперимента. Такой подход был обусловлен тем, что классики заимствовали свой метод из естествознания. Например, А. Смит в своих исследованиях о природе и причинах богатства народов использовал положения и принципы физики того времени. Огромное влияние на А. Смита оказала теория И. Ньютона. Или «Экономическая таблица» Ф. Кенэ (1758), отображавшая кругооборот общественного продукта, была построена на метафоре кровообращения.

Позднее, во второй половине XIX в. представитель маржинализма Л. Вальрас настаивал на сходстве политической экономии с физико-математической наукой, подчеркивая, что математические науки на основе аксиом строят конструкции своих теорем, затем их доказывают и только потом обращаются к опыту, но не для того, чтобы подтвердить исходные положения, а чтобы применить свои выводы.

Рационалистические установки Л. Вальраса способствовали переходу экономической теории к методологическим стандартам формализованного знания на основе использования языка математики. Главным средством анализа стало построение математических моделей, а главным критерием их научности — логическая строгость выводов. Примером формализованного подхода стала книга П. Самуэльсона «Основания экономического анализа», в которой в качестве основного методологического принципа провозглашено выведение операционально значимых теорем. При этом под *операциональностью* понимается эмпирическая проверяемость или хотя бы возможность проверяемости. Такой подход — хорошая иллюстрация позитивистского понимания взаимоотношений теории и эмпирии.

Чем обусловлено развитие физики и других естественных наук? Прежде всего — практическими потребностями человечества. Например, в XIX в. для удовлетворения потребности в строительстве тепловых машин, способных превращать тепло в работу, возникает целое направление в науке — термодинамика. Вся история человечества свидетельствует, что если у общества появляется серьезная потребность, то это продвигает науку вперед больше, чем несколько университетов.

Спрашивается, а есть ли сейчас какая-либо серьезная потребность у человечества? Сдерживается ли чем-нибудь его глобальное развитие? К сожалению, такая проблема есть. И это ни много ни мало как потребность *выживания современной цивилизации*. Нам предстоит тщательно разобраться, не сгущаются ли краски при такой постановке вопроса, что говорит современное естествознание о сути глобальных проблем и, самое главное, о принципиальных возможностях выхода из глобального кризиса. С анализа самых острых и наиболее актуальных глобальных проблем человечества мы и начинаем наш курс.

# Глава 1

## ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОСТИ

### 1.1. Анализ и синтез. Цель естествознания

Почему сосуществует много естественных наук (физика, химия, биология и т.д.), каждая из которых дробится еще на несколько направлений? Например, в физике можно выделить механику, термодинамику, электродинамику, оптику, атомную физику, квантовую механику и т.д. Это простой вопрос. Достаточно ясно, что сосуществование множества наук и направлений обусловлено объективной сложностью и многообразием окружающего нас мира. В науке в подобных случаях рекомендуется следующий подход к проблеме: сначала анализ, а потом синтез. Иными словами, сначала задача дробится на несколько более простых частей, которые мы в состоянии рассмотреть. Так мы производим анализ задачи. Затем мы должны провести обратный процесс — воссоздать из разделенных кусочков исходную цельную картину, но уже на новом уровне ее понимания. Этот обратный процесс и называется *синтезом*.

Весь многовековой процесс развития естественных наук по существу есть многовековой процесс анализа окружающего нас мира. Отсюда и множество наук.

Какова главная цель естествознания? Ведь мир един, все части, на которые мы его поделили, существуют только в единстве, а не порознь, а потому и наша главная задача — постигнуть его именно в единстве. Нам совершенно недостаточно знать, из чего состоит мир, нам необходимо знать, как все эти части взаимодействуют, куда мир движется и как развивается. Познание мира в его единстве, т.е. во всей его сложности и многообразии, позволяет следить за его динамикой и делать прогноз. Наука тогда становится наукой, когда она способна прогнозировать.

С этой точки зрения многовековой процесс развития естественных наук обладает существенным недостатком: гипертрофированное внимание уделялось анализу, а объединяющий все науки процесс синтеза практически не развивался. В результате человечество столкнулось с серьезнейшими проблемами существования биосферы, что заставило в последние десятилетия заняться и объединительным процессом.



Почему важнейшему процессу синтеза уделялось недостаточное внимание? Произошло это неслучайно. Во-первых, задача небывалого синтеза всех наук, занимающихся изучением биосферы, суперграндиозна. Сразу перед нами встает множество труднейших вопросов. Например, поскольку огромное влияние на деятельность биосферы оказывает человек, при синтезе нужно учитывать не только естественные науки, а вообще все, которые влияют на развитие, в частности общественные или социальные науки и процессы. Разумеется, нужно учитывать и экономические законы и процессы. Можно представить, насколько сложна и непривычна состыковка столь различных направлений исследований.

Во-вторых, на пути решения этой задачи небывалого синтеза имеются и принципиальные препятствия, что мы отметим особо.

## **1.2. Биосфера и принципиальная трудность при ее исследовании**

*Биосфера* — это земное пространство, в котором существует жизнь. Границы биосферы определим по теории академика В. И. Вернадского. Верхней границей биосферы можно считать озоновый слой, расположенный примерно на высоте 20 км. Логика здесь простая: озоновый экран задерживает основную часть ультрафиолетового излучения Солнца, губительно действующего на живые организмы. Нижняя граница биосферы проходит на глубине 3—3,5 км ниже поверхности земной коры. Эта граница определяется температурой, при которой жизнь уже невозможна. За такую температуру Вернадский принял +100°С.

Ввиду особого влияния на жизнь человека биосфера является необычным и принципиально трудным объектом исследования для естественных наук. Принципиальное затруднение относится здесь к самому главному в науке — к методу исследования.

Что является основным методом исследований в физике (да и в других естественных науках)? Основным методом исследований в физике является опыт, эксперимент. Критерий истины — эксперимент, ставящий окончательную точку при сосуществовании различных теорий, гипотез или мнений. Дело в том, что обычно эти различные теории, гипотезы или мнения являются достаточно грубыми моделями, каждая из которых чем-то пренебрегает или чего-то не учитывает в сложной действительности. Все учитывает только реальный процесс, который и дает нам истинный ответ.

Чтобы изучить свойства биосферы, прежде всего ее возможные отклики на самые различные воздействия со стороны хозяйничающего человечества, необходимо было бы проведение множества экспериментов с биосферой, а вот это как раз и невозможно в принципе. Прямое экспериментирование с биосферой невозможно не потому, что оно стоит баснословно дорого, а потому, что оно чрезвычайно опасно для жизни человечества. Один неудачный эксперимент — и нет Человека в биосфере или даже самой биосферы.



Есть ли выход из такой сложной ситуации? Да, есть. Остается только один путь — математическое моделирование. Математическая модель является единственным средством получения информации о возможном состоянии биосферы вследствие крупномасштабных воздействий на нее Человека. Но прежде чем разбираться с такими сложными моделями, давайте сначала проанализируем правомерность постановки вопроса о реальности угрозы выживанию современной цивилизации. Вдруг окажется, что существенных опасностей нет, отдельные проблемы можно решить и тогда не надо будет так уж срочно заниматься математическими моделями и их анализом.

### **1.3. Тревожные факты и тенденции**

Имеется множество тревожных фактов разного калибра и разной степени достоверности. Разделим их на три группы по источникам информации: телевидение, газеты; популярные журналы; научные журналы и книги. Разумеется, основное внимание будет уделено научным источникам, но справедливости ради отметим, что задуматься заставляет информация из всех источников. Центральное телевидение: «Половина России пьет воду, непригодную по мировым стандартам, даже для стирки белья» (19 ноября 1993 г.); «В Москве-реке обнаружены молекулы — продукты синезеленых водорослей, разрушающие иммунную систему организма. Ни кипячение, ни хлорирование не уничтожают эти молекулы. Такие молекулы обнаружены и в других странах» (16 декабря 1993 г.); «В Братске здоровы только 4% детей» (19 декабря 1993 г.).

Подобные сообщения могут стимулировать интерес к более серьезным источникам. Всесоюзная независимая комплексная экологическая экспедиция опубликовала ряд своих материалов в журнале «Юность». Довольно подробно описана ситуация в двух известных молодых городах, которые строил в 1930-е гг. весь Союз: в Березниках (Пермская область) и в Комсомольске-на-Амуре.

«В Березниках отмечается постоянное комплексное воздействие на население группы химических факторов. Причем в больших концентрациях... У детей наблюдается отставание в физическом развитии, уменьшение объема грудной клетки, ухудшение памяти, повышенная утомляемость. У женщин процесс беременности протекает с осложнениями и патологией... С 1972 по 1988 г. количество учащихся в школах для умственно отсталых увеличилось здесь в 8 раз» (1989 г., № 8).

Комсомольск с населением 320 тыс. чел. «стоит на одной из величайших рек мира, а не может решить проблемы чистой воды. Четыре пятых потребляемой воды, в том числе и питьевой, город берет из Амура. В Амур же, только в нашем крае, сбрасывается 35 тысяч тонн загрязняющих вредных и ядовитых веществ. Предельно допустимая их концентрация в Амуре превышает в 24 раза. Сам Комсомольск “грешит”

с размахом — его годовой сброс способен отравить сток трех таких рек, как Амур. В результате вода, еще 10 лет назад числившаяся в высшей категории, сегодня в четвертой. Существует семь категорий. Седьмая — это смерть всего живого. При этом городской водозабор находится в черте города. Представляете, что пьют люди. Наивно уповать на очистные сооружения, ведь они рассчитаны только на воду высшей и первой категории» (1990 г., № 7).

Может возникнуть справедливое желание сосредоточиться и решить проблемы Березников и Комсомольска. Но при разработке программы необходимо учесть полные и научные данные по всей стране. Есть ли они? Да, есть. Посмотрим, например, «Национальный доклад СССР к конференции ООН 1992 г. по окружающей среде и развитию» (Рио-де-Жанейро). Здесь есть ответы на многие важные вопросы. Например, на каком расстоянии от горно-металлургического комбината портится окружающая среда. В Норильске это так. Повреждение лесов отмечается на расстоянии 200 км на юг от Норильска. В радиусе 120 км естественное возобновление деревьев отсутствует. А тенденция развития такова: если в 1970 г. площадь погибших лесов составила 6000 га, то в 1988 г. — 382 000 га.

Современные исследования деградации лесов в Норильском районе по зимним космическим снимкам (зимой отчетливо выявляется осаждение на снежный покров аэрозолей промышленного происхождения) выявили соответствие между ореолом загрязнения снегового покрова и концентрацией тяжелых металлов (Cu, Ni, Co) в почве. «Концентрация металлов в почве на расстоянии до 40 км от Норильского комбината превосходит фоновый уровень в 10—1000 раз. Активное накопление металлов фиксируется в верхнем горизонте почвы (до глубины 10 см)» (И. В. Ильин, А. В. Иванов, 2009).

Важно знать некоторые данные по наиболее обеспеченному столичному Московскому региону. В воздухе города зарегистрированы опасные концентрации вредных веществ: диоксида азота — 28 ПДК (ПДК — предельно допустимая концентрация), формальдегида — 57 ПДК, фенола — 45 ПДК. На жилую зону города выпадает до 295 мг/км<sup>2</sup> в сутки бенз(а)пирена — наивысший уровень для городов страны. До половины валового выброса загрязняющих веществ дают заводы и крупные ТЭЦ, расположенные в черте города. Пока ни одна московская ТЭЦ не укладывается в допустимые нормы и не имеет планов по их достижению. На предприятиях Минэнерго улавливается всего 18% вредных веществ.

Существует реальная опасность загрязнения подземных вод, а это проблема на десятилетия, потому что непонятно, как их очищать. В целом подземные воды не защищены примерно на 60% территории Московской области. Идет неуклонное усиление проникновения в подземные горизонты загрязненных поверхностных и грунтовых вод. Этому способствует и отсутствие контроля над эксплуатацией скважин. Из общего громадного количества промышленных отходов 36% просто

вывозится на свалку и 10% скапливается на территории предприятий, откуда они бесконтрольно сбрасываются в городские канализационные и ливневые сети, нелегально вывозятся на неорганизованные свалки, число которых измеряется сотнями.

Отсутствует система утилизации токсичных отходов, в результате чего они попадают на обычные свалки. За последние 10 лет площадь сильно загрязненных почв увеличилась на 142 км<sup>2</sup>, а площадь с низким уровнем загрязнения снизилась вдвое.

В Москве некроз (т.е. отмирание) листьев и хвои охватывает более 15—20% насаждений. Наблюдения показывают, что почти все растения в городе хронически и давно болеют.

К сожалению, в России есть города, где хронически болеют не только насаждения. В Дзержинске (Нижегородская область) проживает 300 тыс. чел., половина из которых работает на химических предприятиях. Средняя продолжительность жизни мужчин — 42 года, женщин — 47 лет. У многих причина смерти не установлена, так как для этого требуются дополнительные исследования. Почти 75% детей появляются на свет с врожденными патологиями (журнал «Итоги», 1997 г., № 41, с. 56).

Ситуация с загрязнением в нашей стране не является уникальной. Это беда всей Земли, загрязнение среды во всем мире стремительно растет. Состояние окружающей среды оказывает огромное, решающее влияние на здоровье человека. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), до 80% заболеваний являются производными от воздействия экологических факторов. Но есть и другие мнения. П. Г. Олдак (1990) полагает, что в настоящее время «около 95% всей патологии прямо или косвенно связано с окружающей средой, которая является либо причиной возникновения заболеваний, либо способствует их развитию».

Самое опасное влияние загрязнения среды на здоровье людей заключается в быстром росте генетического груза. Среда насыщается множеством агентов, способных проникать в клетку и поражать молекулу ДНК, т.е. вызывать мутацию, которая не излечивается и сразу же проявляется у детей. Такие агенты называются мутагенами, в отличие от канцерогенов, вызывающих «всего лишь» рак.

Вообще говоря, у человечества всегда был какой-то процент людей с испорченной генетической наследственностью. Обычно эта доля людей находится на уровне около 3%. Она и называется генетическим грузом. Но в 1960-х гг. этот груз начинает быстро расти и к 1980-м гг. переходит, по данным ВОЗ, 10%-й рубеж. Перечень наследственных и генетически обусловленных заболеваний превышает сейчас 2000 наименований.

Итак, перед человечеством стоит очень сложная задача защиты самого драгоценного, что он получил в результате всей биологической эволюции, а именно — своей собственной генетической информации. Нарастающее загрязнение окружающей среды и связанное с ним ухуд-

шение здоровья людей, особенно необратимое разрушение генофонда человека, не оставляют сомнений в актуальности глубокого естественного анализа современных глобальных проблем.

Отметим, что ученые-естественники давно и решительно предупреждали о надвигающейся катастрофе. И это не единицы или десятки человек, а сотни и тысячи. К сожалению, у нас мало известно о почти безнадежной попытке *2200 ученых-естественников обратиться с воззванием к людям планеты*: «Всем нам угрожает одна и та же небывалая и общая опасность. Она не сравнима по своей природе и масштабам ни с какой другой опасностью, которая когда-либо угрожала человечеству... Мы абсолютно уверены, что все эти реально существующие проблемы взаимозависимы друг от друга и глобальны по своим масштабам. Они представляют вполне реальную угрозу для жизни человека на Земле» («Курьер ЮНЕСКО», июль 1970 г.).

Особо отметим, что ответственность за сложившуюся ситуацию в большой степени несет и естествознание, допустившее во многих случаях неполное и некачественное решение проблем научно-технического прогресса. Поэтому ученые-естественники сейчас должны провести огромную работу по выходу из современного глобального кризиса.

## 1.4. Мысленные модели

Каждый человек постоянно использует мысленные модели для принятия решений как в личной жизни, так и в работе. Мысленный образ о чем-либо или о ком-либо есть модель. Чем больше мы знаем, тем полнее модель. Мысленный образ окружающего нас мира также есть модель.

Представим себе, что один или несколько человек изучили всю имеющуюся информацию, например, о нашей стране. В результате каждый из них (в том числе, допустим, и вы) обладает самой точной и полной мысленной моделью. Принципиален вопрос: сможет ли эта группа людей, даже обладая властью (кто-то из них стал президентом, остальные — правительством) и посоветовавшись день, неделю или месяц, разработать четкую программу решения всех проблем? Может, нам нужно всего лишь сместить плохих правителей и выбрать этих хороших и умных?

Чтобы ответить на этот принципиальный вопрос, необходимо разобратся в особенностях человеческого ума и мысленных моделей.

Мысленная модель, как правило, смутна. Она неполна. Она не точно сформулирована. Более того, у отдельной личности мысленная модель меняется со временем и даже на протяжении одной беседы. Она может быть корректной по своей структуре и предположениям, но даже в этом случае человеческий ум — будь то индивидуальное либо коллективное мнение — крайне подвержен тому, чтобы вывести из нее ложные заключения.



Иными словами, если даже вы (президент) и соберете самое лучшее правительство, то и оно не сможет разработать концепцию развития страны, пользуясь даже хорошей коллективной мысленной моделью.

Законен вопрос: почему?

Конгрессу США это тоже было чрезвычайно интересно, и он в 1970 г. заслушал доклад профессора Джея Форрестера под названием: «Контринтуитивное поведение социальных систем».

Основной тезис доклада состоял в том, что *человеческий мозг не способен постигнуть, как функционируют социальные системы*. Из чего состоят эти системы — постигнуть можно. Наши социальные системы принадлежат к классу, который мы называем *сложными нелинейными системами со многими цепями обратной связи*. Эволюционный процесс не наделил нас мыслительной способностью, нужной для правильной интерпретации динамического поведения таких систем, элементом которых мы теперь стали сами.

В случае простых систем причина и следствие прослеживаются просто, и ошибки обнаруживаются сразу. За причиной недвусмысленно следует результат.

Но в случае сложных систем причина и следствие тесно не связаны ни во времени, ни в пространстве. Причины какого-либо наблюдаемого симптома могут лежать в очень отдаленном секторе социальной системы. Другими словами, воздействие на социальную систему может когда-то и где-то дать прямо противоположный ожидаемому результат. Это и имеет в виду профессор Форрестер, когда говорит о контринтуитивности поведения сложных систем.

Скажем об этом несколько проще. Человеческий ум хорошо приспособлен к анализу элементарных сил и действий, составляющих систему, и весьма эффективен при описании структуры сложной системы. Коротко говоря, человек может хорошо изучать, представлять и мысленно моделировать статичную картину, т.е. срез ситуации на данный момент времени, пусть даже ситуация и не проста. Но опыт показывает, что как только человек захочет предсказать поведение системы в будущем, пользуясь своими мысленными моделями, он сталкивается с непреодолимыми затруднениями, потому что мозг не может оценить и рассчитать все многочисленные взаимосвязи множества элементов системы. Наш разум не приспособлен для оценок динамических последствий, когда части системы взаимодействуют друг с другом. Об этом однозначно говорит основной критерий истины — опыт.

Получается, что человечество, пользуясь мысленными моделями окружающего нас мира, обречено планировать свое развитие простейшим методом проб и ошибок (чаще, как видим, именно ошибок)? Нет. Наука отыскала принципиальный выход из этой трудной ситуации, потому что нашла правильный метод. Метод заключается в использовании не мысленных моделей окружающего нас мира, а компьютерных моделей.

## 1.5. Компьютерные модели

Компьютерные модели объединяют все сильные стороны человеческого ума с мощностью современной вычислительной техники. Заложив в компьютер и правильную модель, и систему взаимосвязей, мы устраняем величайшую слабость человеческого ума — его неспособность оценить все динамические последствия поведения сложных систем.

С помощью компьютерных моделей можно изучать динамику не только одной страны, но и всего человечества.

Создатель первых компьютерных моделей мировой системы «МИР-1» и «МИР-2» Джей Форрестер отмечает ряд интересных и характерных особенностей подобных моделей. Отметим, например, что обычно трудности состоят не в нехватке информации, а в ее избытке и в необходимости избирательного подхода к ней. И дело не только в том, что существует значительно больше информации, чем имеет смысл включать в модель, но также и в том, что она не систематизирована. Разнообразная информация должна быть систематизирована.

Самой важной информацией в установлении структуры системы является идея, что все изменения обуславливаются «петлями обратных связей». Петля обратной связи — это замкнутая цепочка взаимодействий, которая связывает исходное действие с его результатом, изменяющим характеристики окружающих условий, которые, в свою очередь, являются «информацией», вызывающей дальнейшие изменения.

В качестве простейшего примера обратных связей можно рассмотреть основные факторы, влияющие на численность населения. Вообще говоря, число ежегодно рождающихся детей пропорционально численности населения. Через некоторое время, когда дети вырастут и станут родителями, может родиться еще больше детей, что приведет к еще большему увеличению численности населения. Это пример контура с положительной обратной связью. Такой контур вызывает все ускоряющийся рост.

Но необходимо рассмотреть и факторы, влияющие на смертность. Их много. Как и на рождаемость, на смертность оказывает влияние и уровень доходов, и состояние образования и здравоохранения, и религия, и возрастная структура населения, и загрязнение окружающей среды. Число умерших равно общей численности населения, умноженной на средний коэффициент смертности (усредненный по возрастным группам и регионам). Возрастание численности населения приводит, вообще говоря, к увеличению числа умерших, и, следовательно, к ускорению процессов уменьшения численности населения. Это пример отрицательной обратной связи. Соотношение между двумя данными контурами определяет динамическое поведение модели. Если рождаемость выше смертности, то численность населения растет экспоненциально. Разумеется, с течением времени величина коэффициентов

рождаемости и смертности не остается постоянной, что необходимо учитывать и в моделях.

Из принципов системной структуры следует, что в системе с петлями обратных связей необходимо ввести два типа переменных — уровни и темпы. *Уровни* — это накопители системы. *Темпы* — потоки, вызывающие изменение уровней. Например, банковский баланс — системный уровень, он возникает вследствие накопления «чистой» разницы между денежными потоками «в» и «из».

Уровни существуют во всех подсистемах: финансовой, физической, биологической, психологической и экономической. Население, как создающееся в результате аккумуляции «чистой» разницы между темпом рождаемости и темпом смертности, должно рассматриваться как уровень мировой системы.

Все системы, которые изменяются во времени, могут быть представлены как конструкции только уровней и темпов. Иными словами, эти два типа переменных не только необходимы, но и достаточны для описания любой системы.

Более подробно о компьютерных моделях мировой системы можно узнать в книге Дж. Форрестера «Мировая динамика». Для нас же сейчас важно, что до создания компьютерных моделей в мире не было ни одного института или организации, которые занимались бы современными проблемами во всей их целостности. Первой такой организацией стал Римский клуб.

Римский клуб был основан по инициативе руководителя фирмы «Italconsult» Аурелио Печчеи в 1968 г. Это оригинальная неофициальная организация, юридически зарегистрированная в Женеве как некоммерческая ассоциация. Римский клуб не обладает ни формальной структурой, ни постоянным штатом, ни фиксированным бюджетом. В него входит около сотни крупнейших ученых и специалистов всего мира на добровольной основе и объединенных лишь духовно.

*Цель Римского клуба — проведение серии исследований под названием «Проект затруднений человечества».*

## 1.6. Пределы роста

В 1972 г. вышел знаменитый первый доклад Римскому клубу «Пределы роста». Научное и административное руководство многонациональной группой ученых, которая провела это исследование за 21 месяц, осуществлял Деннис Медоуз, ученик профессора Дж. Форрестера. Это было логично, потому что первые математические мировые модели были созданы Форрестером, а Медоузу предстояло от моделей «МИР-1» и «МИР-2» Форрестера перейти к более полной и современной модели «МИР-3», что Медоуз блестяще и сделал.

Группа Медоуза изучила *пять основных систем, взаимодействующих на нашей планете:*

- 1) население;
- 2) сельскохозяйственное производство;
- 3) естественные ресурсы;
- 4) промышленное производство;
- 5) окружающая среда (ее загрязнение).

В компьютер были введены все имеющиеся данные об этих системах и их взаимодействии и было проведено множество экспериментов с самыми различными допущениями и вариациями.

Отметим, что разработанная модель мировой системы была соответствующим образом протестирована. Исходя из данных за 1900 г. были получены результаты для 1970 г., хорошо совпадающие с фактическими данными на этот год.

Основной вывод доклада однозначен и заключается в следующем: если существующие тенденции в пяти рассмотренных системах сохранятся, то пределы роста на планете будут достигнуты в следующем веке. Наиболее вероятным результатом будет внезапный и неконтролируемый спад как численности населения, так и производственных мощностей.

Вывод страшен. Ведь что такое неконтролируемый спад населения? Это кризисные явления во всех сферах жизни и гибель сотен миллионов людей. Говорят, что в системе в той или иной форме происходит коллапс. Но если подумать, то совсем неожиданным такой вывод назвать нельзя. Подобный вывод может сделать и любой из нас без всякого компьютера, если ознакомится с динамикой фактического роста данных по пяти системам в предшествующие времена.

Факты говорят, что все системы — и население, и производство питания, и загрязнение среды, и уровень жизни экспоненциально возрастают на протяжении известной нам истории. Человек привык жить в таких условиях, он исходит из роста, рассматривает его как естественную основу человеческого поведения и ассоциирует рост с «прогрессом». Но рост и развитие, оказывается, совсем разные понятия.

Всем ясно, что ограниченность нашей планеты должна когда-то «обрезать» указанные экспоненты и закрыть, таким образом, рост.

Но что же тогда нового дала нам глобальная компьютерная модель? А вот что.

Без компьютерных расчетов с учетом взаимосвязей очень трудно доказать, когда это произойдет. Даже примерно. Все время может быть такой диалог. Например, кто-то (человек или организация) оценил: через 100 лет. Но найдется миллион и специалистов, и неспециалистов, которые будут всегда говорить: «Ну что Вы! Вы учли ту или иную связь? Нет. Вы учли развитие науки? Нет. Ну и помалкивайте». А затем снисходительно: «Вообще-то кое в чем Вы правы, но глобальный кризис будет, может быть, лет через 500. К тому времени и будем решать». И будут удаляться с видом победителей.

Можно убедить «на пальцах» этих людей? Как вы понимаете, — никогда, потому что и у самих убеждающих всегда будет множество



обоснованных сомнений, обусловленных отмеченными выше особенностями человеческого ума.

Глобальная компьютерная модель позволяет проиграть все предложения и допущения, пусть даже самые сумасбродные, и дать ответ. И множество таких допущений вводилось Медоузом в модель. В том-то и сила вывода, что он базируется на анализе множества возможных вариантов развития ситуации.

Вот что нового дала глобальная модель:

1) убедительность выводов;

2) принципиальную возможность изучения выхода из глобального кризиса, потому что на модели можно опробовать и всяческие спасительные варианты и идеи;

3) приблизительные сроки катастрофы. Конечно, год авторы не указывают и не могут указать, так как в разных сценариях спад населения начинается в разное время. Но в большинстве разумных вариантов эти сдвиги всего лишь в десятки лет, а не в сотни.

Поэтому авторы очень аккуратно формулируют свой вывод: они не ручаются за конкретные цифры, но за тенденции развития ручаются.

Подчеркнем еще раз таящее некоторую надежду условие, при котором может наступить крах: он наступит, если только существующие тенденции в пяти рассматриваемых системах сохранятся.

## 1.7. Ограничивающие факторы

Рассмотрим ряд наиболее существенных факторов, ограничивающих рост и обусловленных конечностью нашей планеты. Прежде всего, это пища. Первичным ресурсом, необходимым для производства продуктов питания, является земля. Известно, что самое большее, чем располагает человечество, это 3,2 млрд га земель, потенциально пригодных для ведения сельского хозяйства. 1,6 млрд га, самая лучшая и доступная часть, уже обрабатывается, остальное требует огромных капиталовложений.

При существующей продуктивности земель на одного человека требуется около 0,4 га пахотных земель. Это довольно скромные потребности. Например, чтобы прокормить все население мира по стандартам США, потребовалось бы 0,9 га земли на одного человека. Тенденции же таковы, что величина имеющихся в наличии пахотных и потенциально пахотных земель уменьшается из-за того, что по мере роста численности населения они изымаются под городское и промышленное строительство. В начале XXI в. ощущается острая нехватка продовольствия в мире (в среднем на душу населения).

Решит ли проблему резкое повышение урожайности, например, с помощью научных открытий? Оценки с помощью глобальной модели гипотетического роста среднемировой урожайности одного гектара в два раза показывают, что продовольственный кризис не исчезает

и отодвигается всего лишь лет на 30. Главная причина — экспоненциальный рост населения.

В цифрах рост населения выглядит так:

- 1650 г. — 0,5 млрд;
- 1820 г. — 1 млрд;
- 1930 г. — 2 млрд;
- 1959 г. — 3 млрд;
- 1977 г. — 4 млрд;
- 1987 г. — 5 млрд;
- 1999 г. — 6 млрд;
- 2011 г. — 7 млрд.

Видим, что человечество сейчас всего за 10 лет добавляет к себе целый мир пушкинских времен. Соответственно, чтобы не снизить уровень жизни, оно за 10 лет должно построить и освоить столько же, сколько все человечество до 1820 г.

Исследованию демографического процесса посвящено много работ. Одной из самых интересных является работа С. П. Капицы, о которой лауреат Нобелевской премии академик Жорес Алферов сказал: «Полная и убедительная теория, развитая Сергеем Капицей, открывает путь к новому и объективному пониманию глобальных проблем, стоящих перед человечеством». Делается вывод, что человечество на всем пути неизменного гиперболического роста, в общем, располагало необходимыми ресурсами и энергией, без чего невозможно было бы достигнуть нынешнего уровня. Однако производительные силы обеспечивали рост, но принципиально не ограничивали его. Автор подчеркивает, что «проблема состоит не в ресурсном ограничении, не в глобальном недостатке энергии, а в социальных механизмах управления и распределения знаний, богатства и земли».

Второй ограничивающий фактор — запасы пресной воды. Потребление ее также растет экспоненциально, и в какой-то момент она будет потребляться полностью, остановив рост населения. По имеющимся оценкам, уже сейчас почти 2 млрд чел. живет в условиях недостатка воды, особенно недостатка чистой воды. Число людей, страдающих от заболеваний, связанных с водой, исчисляется многими сотнями миллионов человек. По данным ЮНЕП (доклад ГЕО-4, 2007 г.), «...к 2025 г. 1,8 млрд чел. будут жить в странах и регионах с абсолютным дефицитом водных ресурсов, а две трети людей во всем мире будут испытывать стресс, вызванный недостатком воды».

Производство синтетической пищи и опреснение морской воды могут лишь отодвинуть момент остановки роста, но не способны предотвратить его в принципе. Кроме того, даже для отсрочки потребовался бы колоссальный рост промышленности, а этот рост, в свою очередь, требует наличия запасов невозпроизводимых ресурсов — топлива и минералов.

В «Пределах роста» приведена таблица, показывающая, насколько хватит конкретных минералов и элементов, если разведанные запасы

возрастут в пять раз. По большинству минералов запасы будут исчерпаны в следующем веке. Например, нефти хватит примерно на 50 лет.

Поразмышляем над этой цифрой. Самая оптимистическая оценка такова: если бы наша планета представляла собой резервуар, целиком заполненный нефтью, то при существующих темпах роста ее добычи этих запасов хватило бы на 350 лет. Учитывая это, вряд ли можно доказать, что Медоуз ошибается более чем в два раза.

Авторы осуществили «проигрывание» на ЭВМ и варианта со «сверх-оптимистической» оценкой запасов полезных ископаемых. В этом варианте рост будет остановлен резким увеличением загрязненности среды.

Загрязнение окружающей среды является активно действующим ограничивающим фактором. Здесь много неизвестного, потому что способность природы «самоочищаться» от продуктов загрязнения в полной мере пока не изучена. Но мы знаем следующее:

- 1) верхний предел загрязнения неизвестен;

- 2) загрязнение растет экспоненциально;

- 3) «естественное запаздывание» по принятию мер создает опасность, что меры против загрязнения будут приняты слишком поздно. Если, например, прекратить применять ДДТ, то его содержание в рыбах будет возрастать еще 10 лет, так как используемый ДДТ в конце концов попадает в океан и содержится в планктоне;

- 4) многие виды загрязнения имеют тенденцию к глобальному распространению;

- 5) содержание диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) в атмосфере неуклонно растет. От сжигания угля, нефти и газа в атмосферу ежегодно поступает около 20 млрд т  $\text{CO}_2$ , и только половину из этого поглощают океаны. Тепловое загрязнение приводит к изменениям климата.

Бороться с загрязнением дорого. Многие страны, можно сказать — большинство, откладывают эти расходы на будущее, но (в качестве премии) могут получить необратимую деградацию.

Интересно, как группа Медоуза решала проблему отсутствия некоторых данных. Например, влияние загрязнения среды на продолжительность жизни в количественном отношении не изучено. Поэтому авторами введен специальный «множитель загрязнения». Если, допустим, он равен 0,9, то это значит, что загрязнение снижает продолжительность жизни на 10%. Если множитель слишком резко меняет поведение системы, то это указывает на настоятельную необходимость исследования данного фактора.

Учитывая всю совокупность ограничивающих факторов и имеющиеся тенденции, авторы весьма решительны в своем главном выводе: «В предположении отсутствия крупных изменений в существующей системе рост населения и промышленности обязательно прекратится не позже следующего столетия».

Но где же выход? Может быть, научно-технический прогресс скажет свое веское слово?

## 1.8. О влиянии научно-технического прогресса на основные тенденции глобального развития

В истории человечества было немало примеров, когда скачки в развитии новых технологий помогали отодвигать потолок физических ограничений на пути увеличения численности населения и экономического роста. Поэтому у многих складывается впечатление, что так будет продолжаться и дальше, что скачки в разработке новых технологий помогут решить все проблемы. Разумеется, такое впечатление обычно не подкреплялось никакими расчетами. Что же дают оценки с помощью глобальных компьютерных моделей относительно возможностей научно-технического прогресса?

Прежде всего, допустим, что человечество решило проблему энергии. Основания к предположению — строительство атомных реакторов-размножителей, увеличивающих срок службы расщепляемых видов топлива (уран), а также, возможно, решение проблемы управляемого ядерного синтеза.

Предположим, что при этом наши ресурсные запасы возросли вдвое за счет осуществления возможности переработки руд с низким содержанием минералов. Предположим также, что осуществление программ по повторной добыче минералов из отходов производства и их вторичной обработке снизит потребность в первичных ресурсах на единицу выпускаемой промышленной продукции до одной четверти того объема, который требуется сегодня.

К сожалению, введение этих весьма оптимистических допущений в модель мира не приводит к принципиальным изменениям. Оценки показывают, что в этом случае обеспечивается более продолжительный период роста населения и промышленности, но также не беспредельный. В конечном счете все равно начинается резкий спад из-за катастрофического загрязнения среды, которое приводит к падению сельскохозяйственного производства.

Сделаем дополнительное допущение — резко усовершенствованы методы очистки отходов производства и вообще контроля над загрязнением среды. Будем считать, что удалось снизить загрязнение от всех источников в четыре раза. Авторы отмечают, что такое снижение загрязнения нереально из-за высокой стоимости работы, а также вследствие технической сложности обеспечения защиты от некоторых видов загрязнения, таких, как тепловое загрязнение, загрязнение радиоактивными отходами, утечка удобрений и т.д. Но в вычислительном эксперименте подобное допущение, разумеется, оправдано. Результаты показывают, что в данном случае население, промышленность, производство продуктов питания растут несколько дольше, но затем опять-таки наступает резкий спад: обрабатываемая площадь не может больше увеличиваться, и причиной спада является нехватка продовольствия.



В дополнение к вышеприведенным допущениям введем в модель увеличение урожайности каждого гектара земли в два раза. Одновременно пусть успехи медицины позволяют регулировать рождаемость, и рождается лишь запланированное потомство. Но и с такими допущениями расчеты показывают, что рост системы все равно прекращается ранее 2100 г. Загрязнение среды сначала немного падает, а потом начинает резко увеличиваться, потому что даже самая совершенная система очистки не ликвидирует отходы полностью. Хотя загрязнение на единицу выпускаемой продукции снижается, громадный рост производства все же приводит к деградации окружающей среды.

*Итак, расчеты с помощью глобальной компьютерной модели показывают, что научно-технический прогресс не может сделать рост мировой системы безграничным. Он позволяет лишь раздвигать границы роста. Однако сам факт конечности размеров земного шара остается фундаментальным и непреодолимым ограничением.*

## **1.9. Многоуровневая компьютерная модель**

Не связаны ли результаты работы группы Медоуза с каким-либо несовершенством их модели? Оправдано ли, например, столь глобальное усреднение всех параметров по всему миру? Точнее было бы учесть различия отдельных регионов. И такая более сложная и более совершенная модель была разработана в рамках программы Римского клуба. Второй доклад Римскому клубу «Человечество на перепутье» был сделан М. Месаровичем и Э. Пестелем в 1974 г. на годичной встрече клуба в Западном Берлине. Это результат работы двух первоклассных исследовательских групп (одна — в США, другая — в ФРГ).

Отметим, что это был не стандартный кратковременный доклад, какие обычно бывают на конференциях. Месарович и Пестель рассказывали о своей работе ста ученым из разных стран в течение недели. Подробные материалы были опубликованы ими в шести томах под названием «Многоуровневая компьютерная модель системы мирового развития».

Особое внимание уделялось добыванию самой достоверной и надежной фактической информации обо всех происходящих в мире процессах. Адекватность всех используемых данных многократно проверялась и перепроверялась с помощью специализированных учреждений и частных консультантов, представляющих различные области науки.

Самое существенное изменение в глобальной модели заключалось в переходе от усредненных характеристик мировых тенденций к разбиению мира на 10 взаимодействующих регионов: Северная Америка, Западная Европа, Япония, Южная Америка и Австралия, СССР и Восточная Европа, Латинская Америка, Северная Африка и Ближний Восток, тропическая Африка, Китай и Южная Азия.

Стоит отметить: авторитет Римского клуба был к тому времени настолько высок, что в обсуждении второго доклада приняли участие

многие руководители государств, например, канцлер Австрии, премьер-министры Швеции и Канады, президенты Сенегала и Мексики.

К огромному сожалению, главного вывода трехлетняя работа групп Месаровича и Пестеля не изменила. Глобальная катастрофа все равно случится, только начнется она с ряда региональных кризисов, некоторые из которых произойдут даже раньше, чем предсказывала группа Медоуза. Необходим коренной пересмотр существующих тенденций мирового развития.

Отметим огромное положительное зерно разработки глобальных компьютерных моделей. Это всего лишь начало внедрения в нашу жизнь рационализации процесса принятия решений, и от дальнейшего развития исследований в этой области во многом зависит наше будущее. Появилась принципиальная возможность постепенно отойти от бесперспективного метода проб и ошибок и сделать правилом принимать важнейшие решения после тщательного анализа с использованием соответствующих компьютерных моделей.

## 1.10. Устойчивость биосферы. Бифуркация

Рассмотренные глобальные компьютерные модели учитывают не все. Может случиться, что необратимый кризис разразится даже раньше, чем предсказываемый по тому или другому сценарию модели, если мы оставим без внимания вопрос о допустимых антропогенных нагрузках на биосферу. Верхний предел нагрузок неизвестен, но необходимо четко представлять, что может произойти, если он будет достигнут.

Из теории сложных динамических систем, примером которых является биосфера, следует, что когда нагрузки на систему начинают превосходить некоторый предел, то состояние системы теряет устойчивость, и система «выходит на пересечение» нескольких каналов эволюционного развития. Это означает, что допустимой оказывается целая совокупность новых состояний. В математике такие точки ветвления, потеря однозначности траекторий развития называются *точками бифуркации*.

Какой из возможных «каналов эволюции» выберет система, по какой траектории пойдет ее развитие после точки бифуркации, предсказать заранее нельзя. Это обстоятельство носит принципиальный характер, поскольку выбор траектории развития будет зависеть от случайных воздействий на систему, которые могут быть и очень малыми.

Бифуркационные механизмы поведения системы часто называют катастрофическими, и их изучает новая дисциплина — *теория катастроф*.

Есть ли какие-нибудь признаки потери устойчивости биосферы? Да, есть. Например, уменьшение генетического разнообразия. Генетическая память — это закодированный опыт жизни, это история ее ста-

новления и приспособления к суровым условиям в окружающем мире, это библиотека знаний о том, как можно преодолеть те или иные трудности. Потеря любого генотипа — это безвозвратная потеря бесценного тома из этой библиотеки. Генетическое разнообразие — это гарантия устойчивости вида. Уменьшение разнообразия — это уменьшение устойчивости и в конечном счете деградация биосферы.

Вообще уничтожить жизнь Человека на Земле сейчас стало очень просто. Существуют расчеты по глобальной компьютерной модели биосферы (называется модель «Гея» по имени древнегреческой богини Земли), которые проведены у нас в стране под руководством академика Н. Н. Моисеева. Особенность модели биосферы «Гея» в том, что в ней нет Человека, «блок Человека» в модели не представлен. Проведенные в 1984 г. расчеты показали, что для уничтожения человечества достаточно использовать в ядерной войне всего 100—150 Мт ядерного горючего, определенным образом раскиданного по городам мира. В результате образуются облака сажи такого размера, что наступит «ядерная зима» и продлится она несколько месяцев, чего достаточно для уничтожения человечества.

Что такое 150 Мт? Это чуть больше, чем на одной атомной подводной лодке.

Для примера обратимся к современным компьютерным расчетам с учетом влияния океанов и атмосферных явлений. В случае возможной войны между Индией (50 ядерных боеголовок) и Пакистаном (60 боеголовок) пожары, вызванные взрывами 100 ядерных бомб (0,4% от всемирного запаса) поднимут в атмосферу 5 млн т дыма и сажи. Это облако накроет регион уже через пять дней. На десятый день оно достигнет экватора, а еще через 4—9 дней мгла окутает всю планету. 20 млн чел. погибнет в зоне конфликта от ударной волны, радиации и пожаров, а 1 млрд жителей планеты умрут из-за разрушения мировой сельскохозяйственной системы. В сельском хозяйстве наступит коллапс. Озоновая дыра, существующая сейчас в регионе Южного полюса, распространится по планете, открыв путь для смертоносного ультрафиолетового излучения<sup>1</sup>.

Чем грозит надвигающаяся потеря стабильности биосферы? Если сложная нелинейная система, какой является биосфера, теряет стабильность, то начинается ее переход, причем необратимый, в некое новое квазистабильное состояние. Какое оно — мы не знаем. И более чем вероятно, что в этом новом состоянии параметры биосферы окажутся неподходящими для жизни человека, а может, и всей биоты. Например, можем перейти в состояние равновесия типа существующего на планетах Венера или Марс.

Но самое страшное то, что подобный переход, вызванный потерей равновесия, происходит со скоростью, возрастающей по экспоненте.

---

<sup>1</sup> Нелинейная динамика глобальных процессов в природе и обществе / под ред. И. В. Ильина, Д. И. Трубецкова, А. В. Иванова. М. : Изд-во МГУ, 2014.

Это означает, что когда катастрофа станет видна всем скептикам, тогда никакие наши действия уже ничего не смогут изменить.

Проблема стабильности биосферы должна превратиться в одно из основных направлений фундаментальных исследований.

Но и в точках бифуркации действует то, что важнее всех глобальных моделей, — это законы природы. Наиболее общие ее законы изучает физика. Спрашивается, а может ли физика что-нибудь сказать о глубинной сущности идущих сейчас кризисных процессов? Безусловно, может. Об этом говорят законы термодинамики, к изучению которых мы и переходим.

## 1.11. Термодинамика и молекулярная физика

В курсах физики раздел «термодинамика» обычно идет в неразрывной связи с молекулярной физикой. К этому есть основания.

*Молекулярная физика* — раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетической теории, которая базируется на трех основных положениях: все вещества состоят из молекул и атомов; все молекулы непрерывно и хаотически движутся; молекулы взаимодействуют друг с другом.

Цель молекулярно-кинетической теории — истолковать наблюдаемые свойства тел (давление, температуру и т.п.) как суммарный результат действия молекул. Чтобы это сделать, молекулярно-кинетическая теория пользуется статистическим методом, не интересуясь движением отдельных молекул, а лишь средними величинами, которые характеризуют движение огромной совокупности частиц. Поэтому молекулярно-кинетическую теорию иногда называют *статистической физикой*.

Но есть и другой подход к изучению свойств вещества — термодинамический. *Термодинамика* не вводит в рассмотрение молекулы и атомы, не входит в микроскопическое рассмотрение процессов, а ее основой являются фундаментальные законы, называемые *началами термодинамики*.

Начала термодинамики установлены из опыта, и при этом нет ни одного факта, вступающего с ними в противоречие.

Подходя к рассмотрению изменений состояния вещества с разных сторон, термодинамика и молекулярно-кинетическая теория взаимно дополняют друг друга, образуя, по существу, одно целое. У статистической физики и термодинамики общий предмет изучения — свойства веществ и происходящие в них процессы.

Термодинамика первоначально возникла как наука о закономерностях превращения тепла в работу с помощью тепловых машин. Круг вопросов, которые она изучает, связан с тепловой формой движения материи, т.е. с хаотическим движением атомов и молекул.

Этот круг вопросов занимает в физике особое положение, связанное с тем, что любой вид энергии в процессе превращений может пройти



через многие формы энергии, но конечным результатом всех таких превращений обязательно будет энергия тепловая.

Действительно, в тепло переходит механическая энергия (из-за трения), энергия электрического тока, энергия света, энергия химических превращений и даже ядерная энергия.

Важно отметить, что понятие равновесия в термодинамике отличается от равновесия в механике. В термодинамике оно более широкое.

Система находится в *термодинамическом равновесии*, если макроскопические величины, определяющие ее состояние, остаются постоянными, например, давление и температура.

Термодинамическое равновесие отличается от механического тем, что хотя макроскопические величины, характеризующие систему, остаются постоянными, частицы системы (атомы и молекулы) не прекращают своих сложных движений. Постоянство макроскопических параметров обусловлено громадным числом этих частиц.

Все законы термодинамики, о которых мы будем говорить, относятся только к системам, состоящим из большого числа частиц. В частности, термодинамическая система может состоять из одного тела — твердого, жидкого или газообразного. Всякий переход системы из одного состояния в другое (термодинамический процесс) связан с нарушением равновесия. Но если переход совершать предельно медленно, то состояние системы в каждый момент времени будет равновесным.

Например, если газ под поршнем быстро сжать, то и равновесие сильно нарушится. Но если сжимать очень медленно, то газ в каждый момент времени будет иметь определенное давление, которое мало отличается в разных точках от своего среднего значения.

Процесс, состоящий из непрерывной последовательности равновесных состояний, называется *равновесным*, или *квазистатическим*.

Идеальный равновесный процесс — бесконечно медленный.

Равновесный процесс обладает той особенностью, что может быть проведен в обратном направлении, причем система будет проходить те же состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Поэтому равновесные процессы называют также *обратимыми*.

Процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние, называется *круговым процессом*, или *циклом*.

Начал термодинамики всего два, и по своей сути они очень просты.

## 1.12. Первое начало термодинамики

На что будет расходоваться подводимое к системе тепло? При ответе на этот вопрос необходимо определиться с понятием внутренней энергии тела (термодинамической системы).

В общем случае *внутренней энергией* тела называется кинетическая и потенциальная энергия молекул этого тела плюс внутримолекулярная энергия. Имеется в виду потенциальная энергия взаимодействия

между молекулами тела, а не их потенциальная энергия во внешнем поле сил (например, в поле сил тяжести).

Внутренняя энергия обладает той особенностью, что в термодинамические формулы входит не она, а ее изменение или производная по какому-либо параметру. Поэтому внутреннюю энергию можно определять с точностью до произвольной постоянной. Если же еще учтем, что в термодинамике обычно изучаются процессы, при которых внутримолекулярная энергия остается постоянной, то в дальнейшем можно пользоваться простейшим определением: внутренняя энергия тела складывается из кинетической и потенциальной энергии его молекул.

Внутренняя энергия является функцией состояния системы.

Понятие функции состояния — важное понятие в физике. Определим его.

*Функцией состояния* системы называется такая функция, которая независимо от предыстории системы в данном состоянии имеет присущее этому состоянию значение.

То, что внутренняя энергия является функцией состояния означает, что независимо от пути перехода системы из начального положения в конечное разность значений внутренней энергии будет одной и той же и всегда равна разности значений в конечном и начальном состояниях.

Подводимое к системе тепло  $dQ$  будет расходоваться на изменение внутренней энергии  $dU$  и на совершении этой системой работы над внешними телами  $dA$ . При этом, конечно, выполняется закон сохранения энергии

$$dQ = dA + dU. \quad (1.1)$$

Выражение (1.1) называют первым началом термодинамики. По существу здесь ничего особенного нет, это просто закон сохранения энергии с учетом тепловых процессов.

Запишем формулировку *первого начала* словами: *количество тепла, сообщенное системе, идет на приращение внутренней энергии системы и на совершение системой работы над внешними телами.*

То же самое можно сформулировать еще проще: *невозможен вечный двигатель первого рода, т.е. двигатель, производящий работу из ничего.*

Вечным двигателем первого рода называют двигатель с коэффициентом полезного действия (КПД) более 100% ( $\eta > 100\%$ ).

В частном случае подводимое к системе тепло может быть равно нулю ( $dQ = 0$ ), т.е. процесс протекает без теплообмена с внешней средой. Такой процесс называется *адиабатическим*.

Уравнение адиабатического процесса внешне похоже на уравнение изотермического процесса.

Уравнение изотермы идеального газа:

$$pV = \text{const.} \quad (1.2)$$

Уравнение адиабаты идеального газа:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (1.3)$$

где

$$\gamma = C_p / C_v. \quad (1.4)$$

В выражении (1.4)  $C_p$  и  $C_v$  — теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно. Важно, что теплоемкость при постоянном давлении  $C_p$  всегда больше теплоемкости при постоянном объеме, потому что при  $p = \text{const}$  нагреваемое тело расширяется и часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы над внешними телами. Следовательно, всегда  $\gamma > 1$ .

### 1.13. Идеальная тепловая машина и ее коэффициент полезного действия

Существенным достижением термодинамики является решение принципиального вопроса о максимально возможном КПД для всех тепловых машин независимо от их конкретного устройства. Общим для всех тепловых машин является обязательное наличие трех частей: нагревателя, холодильника и рабочего тела.

Как показал С. Карно, для всех тепловых машин справедливы следующие две теоремы.

**Первая теорема Карно.** Любая тепловая машина, работающая при данных температурах нагревателя ( $T_0$ ) и холодильника ( $T_1$ ), не может иметь КПД больше, чем машина, работающая по обратимому циклу Карно при тех же температурах нагревателя и холодильника.

**Вторая теорема Карно.** КПД цикла Карно не зависит от рода рабочего тела, а только от температуры нагревателя и холодильника.

Иногда эти две теоремы объединяют в одну теорему Карно с тем же содержанием.

*Циклом Карно* называется процесс из двух изотерм и двух адиабат. Он изображен на рис. 1 для случая, когда рабочим телом является идеальный газ.

На участке  $AB$  (изотерма) рабочее тело получает от нагревателя с температурой  $T_0$  количество теплоты  $Q_0$ . На участке  $CD$  (вторая изотерма) рабочее тело отдает холодильнику с температурой  $T_1$  количество теплоты  $Q_1$ .

Изменение внутренней энергии рабочего тела за цикл равно нулю, потому что тело возвращается в исходное состояние. Следовательно, вся полученная теплота затрачивается телом на совершение работы:

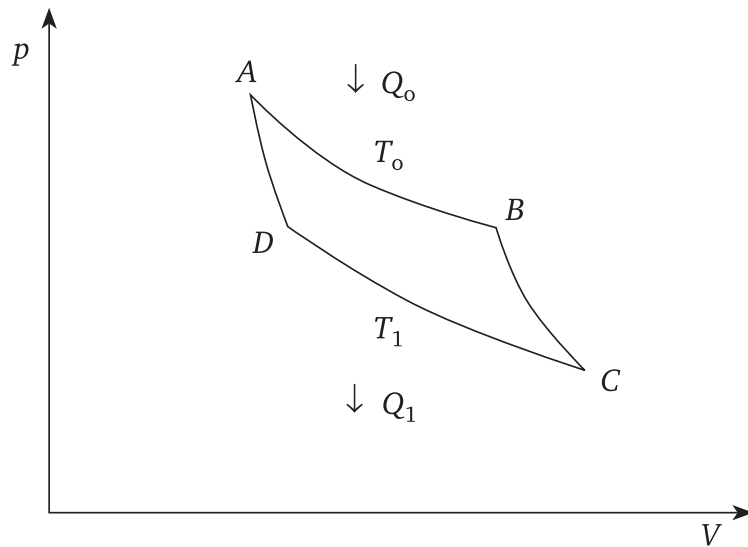


Рис. 1

$$A = Q_0 - Q_1. \quad (1.5)$$

Коэффициентом полезного действия тепловой машины называется отношение совершаемой за цикл работы  $A$  к получаемому от нагревателя за цикл количеству теплоты  $Q_0$ :

$$\eta = \frac{A}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0}. \quad (1.6)$$

В случае, когда рабочим телом является идеальный газ, работа за цикл легко рассчитывается по известным формулам. Но мы это делать не будем, а запишем окончательный результат:

$$\eta = \frac{T_0 - T_1}{T_0}. \quad (1.7)$$

Подчеркнем, что такой КПД будет для любого рабочего тела (согласно второй теореме Карно). При выводе часто выбирают идеальный газ только потому, что известно его уравнение состояния, и это облегчает вычисление КПД.

Цикл Карно обладает важной особенностью: он полностью обратим. Действительно, на всех стадиях он проведен так, что исключает соприкосновение тел с разными температурами, что исключает возможность необратимых процессов теплопроводности.

Тепловая машина, работающая по циклу Карно, является идеальной тепловой машиной, потому что никакими способами невозможно получить КПД выше значения, даваемого выражением (1.7). Абсолютный нуль температуры недостижим (что следует из теоремы Нернста), поэтому КПД любой тепловой машины, в том числе и идеальной, всегда меньше единицы.

## 1.14. Второе начало термодинамики

Второе начало, как и первое, является обобщением всего нашего опыта. У второго начала также есть несколько эквивалентных формулировок. Приведем две. Первая формулировка самая простая: *невозможен вечный двигатель второго рода*.

Вечным двигателем второго рода называется двигатель с КПД, равным 100%.

Смысл второго начала ясен. Превратить все подводимое тепло только в полезную работу невозможно. Обязательно часть тепла потеряется и перейдет, как говорят, к холодильнику в широком смысле этого слова (например, во внешнюю среду). При анализе идеального варианта тепловой машины второе начало было учтено.

Вторая формулировка тоже короткая, но весьма важная, и с ней мы будем разбираться особо: *энтропия изолированной системы не может убывать*,

$$dS \geq 0. \quad (1.8)$$

*Изолированными* (или *замкнутыми*) системами называются термодинамические системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом.

## 1.15. Энтропия

Слово «энтропия» было введено в физику одним из основоположников термодинамики Р. Ю. Э. Клаузиусом. В переводе с греческого оно означает «преобразовать, превратить».

*Энтропией* называется функция состояния системы, изменение которой  $\Delta S$  при обратимом переходе системы из состояния 1 в состояние 2 равно:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}. \quad (1.9)$$

Обозначения здесь стандартные:  $\Delta S = S_2 - S_1$ ,

$$dS = \frac{dQ}{T}. \quad (1.10)$$

То, что энтропия является функцией состояния, означает, что при всяком обратимом некруговом процессе значение интеграла не зависит от пути, по которому идет процесс. При всех путях перехода из состояния 1 в состояние 2  $\Delta S$  будет одним и тем же. Оно определяется только значениями энтропии в состояниях 1 и 2.



Отметим важную особенность энтропии. Равенство (1.9) позволяет определить не абсолютное значение функции  $S$ , соответствующее какому-то состоянию, а лишь ее изменение при переходе от одного состояния к другому. Поэтому можно приписать некоторому состоянию системы значение  $S = 0$  и сравнивать с ним все другие состояния системы.

Детализируем теперь формулировку второго начала термодинамики. Можно показать, что для любого обратимого процесса энтропия замкнутой системы не изменяется:

$$dS = 0. \quad (1.11)$$

При необратимых же процессах

$$dS > 0. \quad (1.12)$$

Пример необратимого процесса: смешиваем две массы воды с разными температурами  $T_1$  и  $T_2$ . Процесс смешения и установления единой температуры может идти сам собой, но обратный процесс разделения смешанных масс ни в коем случае идти не может. При этом необратимом процессе энтропия (как показывает теория) непрерывно возрастает, но только до установления равновесия. Состояние равновесия — это одно и то же состояние, поэтому оно имеет одно и то же значение энтропии, которое является максимальным для данной системы. Без внешнего воздействия оно меняться не будет.

То же самое произойдет и при смешении газов с разной температурой.

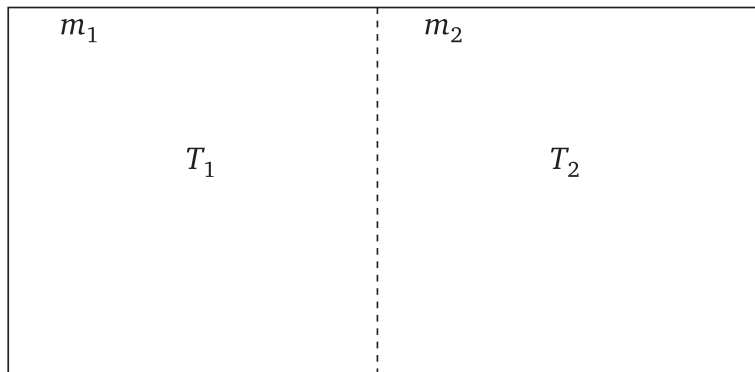


Рис. 2

Уберем перегородку (на рис. 2 изображена пунктиром). Какое состояние газа будет более вероятным: когда все молекулы остаются в своих половинках сосуда или когда равномерно распределены по всему сосуду? Ясно, что более вероятно второе состояние. И вообще, во всякой системе, предоставленной самой себе, процесс пойдет так, что система будет переходить от менее вероятных состояний к более вероятным. Состояние равновесия — это всегда наиболее вероятное состояние. И, как мы отметили, энтропия при этом максимальна.

Отсюда следует, что энтропия и термодинамическая вероятность состояния — связанные между собой понятия.

Термодинамическая вероятность принципиально отличается от той вероятности, которая обычно нами используется. Например, вероятность выигрыша в лотерею —  $x\%$ , вероятность падения монеты орлом вверх —  $50\%$ , т.е. вероятность этих *событий* всегда меньше или равна единице. Термодинамическая же вероятность всегда больше единицы.

*Термодинамической вероятностью состояния* (или *статистическим весом*) называется число способов, которым это состояние осуществляется.

Можно показать, что число способов, которым осуществляется равномерное распределение частиц в объеме сосуда, больше любого неравномерного распределения.

Рассмотрим это на примере четырех молекул (рис. 3).

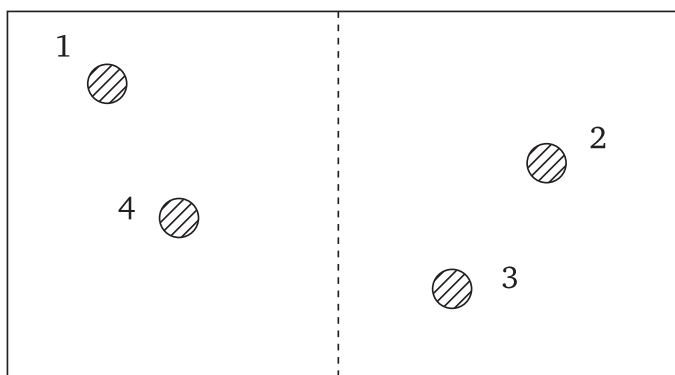


Рис. 3

В данном случае термодинамическая вероятность равномерного распределения равна 6, что хорошо видно из результатов простейшего анализа ситуации, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Число молекул		Число способов реализации состояния
слева	справа	
0	4	1
1	3	4
2	2	6

Но напомним, что в статистической физике и термодинамике мы имеем дело с большим числом частиц, поэтому и термодинамические вероятности — обычно очень большие числа.

Итак, можно сделать важный вывод: *процесс с ростом энтропии характеризует переход системы из менее вероятного состояния в более вероятное.*

В этом и заключается физический смысл энтропии.

Но это еще не все.

Какое состояние в системе более вероятно: упорядоченное или беспорядочное, хаотическое?

Рассмотрим пример. Предположим, что в ящике слева — половина белых шаров, справа — половина черных шаров (рис. 4). Начнем встряхивать. Через какое-то количество встрясок шары распределятся хаотически. При дальнейшем встряхивании практически всегда будет сохраняться беспорядок.

Поэтому *рост энтропии соответствует переходу системы к большему беспорядку. Энтропия является мерой беспорядка системы. В состоянии равновесия беспорядок максимальный.*

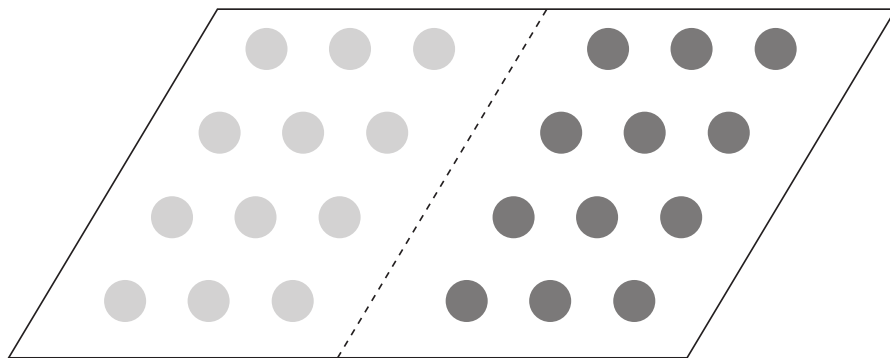


Рис. 4

## 1.16. 0 тепловой смерти Вселенной

Особо остановимся на вопросе о границах применимости второго начала термодинамики. Оно получено из обобщения опытных данных для замкнутой и конечной системы. Пренебрежение этим обстоятельством привело в прошлом веке к провозглашению некоторыми концепции тепловой смерти Вселенной.

Действительно, если применить второе начало к такой системе, как Вселенная, то получаем, что «энтропия Вселенной стремится к максимуму». Значит, когда этот максимум будет достигнут, во Вселенной прекратятся какие бы то ни было процессы, потому что все тела принимают одинаковую температуру и все виды энергии также переходят в тепловую. Действительно, если найдется хоть одно тело с другой температурой, то будет реализовываться процесс теплопередачи, который обязательно, по второму началу, приведет к росту энтропии системы, а это невозможно, потому что энтропия уже достигла максимума. Такое состояние системы и названо *тепловой смертью Вселенной*.

На самом деле никакой тепловой смерти нет, так как нет никаких оснований считать Вселенную ни конечной, ни замкнутой системой. Поэтому *второе начало термодинамики не применимо ко всей Вселенной*.

Вселенная в целом может эволюционировать непрерывно и монотонно, никогда не приходя в состояние термодинамического равнове-

сия. Такая возможность допускается, например, общей теорией относительности.

## 1.17. Энтропия биосферы

Применимо ли к биосфере второе начало термодинамики? Ведь биосфера — явно конечная система, не в пример Вселенной. Грозит ли биосфере тепловая смерть?

Счастье биосферы в том, что она не является замкнутой системой, поэтому второе начало в том виде, как мы его формулировали, здесь неприменимо. Чтобы разобраться с поведением энтропии биосферы, необходимо выйти за границы классической равновесной термодинамики, о которой мы с вами говорили.

Незамкнутые системы физикой также изучаются. Это делается в рамках термодинамики необратимых процессов, или, как еще говорят, в рамках неравновесной термодинамики.

Если бы биосфера была замкнутой системой, то ее энтропия непрерывно бы возрастала, и все сложные упорядоченные структуры, которые характерны для живых организмов, непрерывно бы разрушались, и биосфера двигалась бы к гибели.

Но биосфера является открытой системой, и за счет потока солнечной энергии энтропия биосферы может понижаться. Такое понижение энтропии биосферы действительно происходило на протяжении многих миллионов лет. При этом происходило непрерывное повышение организованности биосферы.

Можно сказать, что для биосферы Солнце является источником потока «отрицательной энтропии».

Огромные запасы «отрицательной энтропии» накапливались в биосфере за счет деятельности фотосинтеза, и они хранятся в ископаемом органическом топливе. Это топливо является примером системы, находящейся в состоянии неустойчивого равновесия, т.е. в нем роста энтропии практически не происходит.

Но вот, исторически совсем недавно человек выступил как активный катализатор механизмов бурного роста энтропии, сжигая это топливо. Скопились запасы отрицательной энтропии миллионы лет, а сжигаются стремительно. В результате энтропия биосферы стала возрастать, что мы и наблюдаем в виде глобального кризиса.

И не помогут здесь никакие частные решения экологических проблем, например, проблем Москвы-реки или всего московского региона. Решение стратегических проблем человечества немислимо вне учета законов термодинамики. Единственный выход — это остановка вызванного только человеком роста энтропии, возвращение биосферы в состояние с постоянным уменьшением энтропии и будущее создание ориентируемой в своем дальнейшем развитии наукой, разумом ноосферы.

*Ноосфера* — сфера разума. Понятие ноосферы введено академиком В. И. Вернадским.

Можно ли привести наглядные примеры, свидетельствующие о процессах роста энтропии биосферы? Можно. Напомним, что рост энтропии характеризует разупорядочение в системе и приближение ее к хаосу. Само сжигание топлива уже есть очевидное уничтожение упорядоченных за миллионы лет структур и существенное возрастание хаоса в биосфере еще и за счет рассеяния в ней множества чужеродных и вредных продуктов сгорания.

Но можно привести и еще более ясные примеры нарастания хаоса в системе. Что является апофеозом хаоса? Это, например, разложение биосферы на атомы или, по крайней мере, истирание ее в пыль, в порошок, в песок. Такие процессы в биосфере идут, причем все более активно. Можно привести и некоторые количественные оценки.

Металлофонд страны, т.е. общее количество металла, находящееся в разных отраслях хозяйства, — около 1 млрд т. Износ составляет около 4%, т.е. миллионы деталей трутся, трутся, трутся и в год истирается 40—50 млн т.

По важнейшему металлу — железу — есть такие данные: его ежегодное рассеивание в среду составляет 250—260 млн т. За 150 лет его было рассеяно 6,5 млрд т.

Кроме истирания есть еще и коррозия. Только коррозия дает около 10% потерь железа, если конструкции не защищены покрытиями. Теряется железо и при его обработке. Примерно треть выплавляемого в мире железа теряется в первый год при его обработке, истирании и коррозии. Превращается в песок не только металл, но и основа жизни — земля. Процессы опустынивания и деградации земли стремительно нарастают. Существуют оценки, что за историческое время (время функционирования человека) на нашей планете, по разным причинам, было утрачено до 20 млн км<sup>2</sup> продуктивных земель при современной пахотной площади 16 млн км<sup>2</sup>.

Для наглядности масштабов процесса деградации приведем официальные данные ООН (ЮНЕП) за последнюю четверть XX в. Потери от урбанизации за 25 лет (1975—2000 гг.) составляют 300 млн га (большая часть прироста населения идет в города). Потери от деградации — тоже 300 млн га. Есть и прирост новых пахотных земель: + 300 млн га (за счет уничтожения лесов).

В итоге к 2000 г. общее количество пахотных земель сократилось на 300 млн га. При этом количество земли на душу населения упало с 0,31 га в 1975 г. до 0,15 га в 2000 г. И земля эта наспиговывается множеством чужеродных ей и нам химических соединений, которые пойдут, естественно, в нас. Уже сейчас содержание свинца в костях человека ~ в 50 раз выше, чем в останках древних предков (Э. В. Гирусов, 1976 г.).

А свинец еще не химическое соединение. Из 2 млн известных нам химических препаратов проверено на канцерогенность несколько тысяч, и всего несколько сот проверено адекватно (т.е. как надо).



Ежегодно в мире синтезируется 250 000 новых химических соединений. Около 1000 химических препаратов ежегодно добавляется к списку выпускаемых промышленностью. Огромный вал не изученных по последствиям препаратов. Что мешает изучить? Цена. Уровень объема исследований на одну канцерогенность хотя еще и не эффективен, а обходится в 100 тыс. долл. на один химический продукт и длится 2—4 года. К этому добавляется практически полная бесконтрольность содержания вредных веществ в воде и воздухе.

Например, установлены ПДК для 728 веществ в воздухе населенных мест. В практических условиях (проектирование, контроль и отчетность) применяют всего 5—7 ПДК: пыль, оксиды серы, азота, оксид углерода, сероводород, аммиак и специальное вещество данного производства.

Эти, а также множество других факторов уже сейчас активно уничтожают органическое вещество биосферы, повышая ее энтропию. Так, масса органического вещества наземной биосферы уже упала в 1,5 раза — с  $2,7 \cdot 10^{12}$  т до  $1,8 \cdot 10^{12}$  т. Хотя масса человечества и выросла, но биосферу не заменит.

Какой из упомянутых «других» факторов явно и напрямую уничтожает биосферу и увеличивает ее энтропию? Систематическая вырубка лесов.

Сейчас тропические леса уничтожают со скоростью 20 га в минуту. Если так пойдет и дальше, то уже через три—четыре десятилетия они окончательно исчезнут с лица Земли. Сведение лесов страшно по многим причинам:

1) уничтожается уникальный генофонд растительного и животного мира;

2) резко возрастает интенсивность эрозийных процессов (в пять—шесть раз). В некоторых районах Шри-Ланки и Бангладеш на месте лесов образовались огромные массивы совершенно бесплодных земель, испытывающих настоящие процессы опустынивания;

3) изменение альбедо (отражения солнечной энергии) изменит муссонную циркуляцию и ослабит проникновение влажного воздуха с океанов на материка;

4) уменьшится поступление водяного пара в атмосферу. Говорят, что гибель тропических лесов равносильна гибели одного океана.

Свидетельством роста энтропии биосферы является и возвращение состава атмосферы к древним временам. Как известно, практически весь кислород возник в результате длительной деятельности биосферы, прежде всего за счет фотосинтеза. Сейчас под воздействием антропогенного фактора фотосинтетическая генерация кислорода упала не менее чем на 30%. Кроме того, сжигание угля, нефти и газа также безвозвратно изымает кислород и добавляет в атмосферу углекислый газ. Ежегодно из атмосферы безвозвратно изымается 32 млрд т кислорода.

Существуют такие оценки. Если сжечь весь уголь планеты, то концентрация кислорода в атмосфере упадет с 21 до 19%. Но, что гораздо

опаснее для жизни, за это же время концентрация углекислого газа возрастет с 0,03 до 3%. *В такой атмосфере человек жить не сможет.*

Очевиден вывод, что сжечь все запасы ископаемого топлива человек не сможет. Погибнет. Сжигание придется прекратить задолго до исчезновения запасов топлива.

Абсолютно все лаборатории мира, расположенные и в горах, и в океанах, четко фиксируют непрерывное экспоненциальное возрастание содержания углекислого газа в атмосфере планеты. За последние 150 лет концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере возросла с доиндустриального естественного стационарного уровня в 280 ppm (*parts per million*) до 390 ppm. Это привело к повышению средней глобальной температуры примерно на 0,6–1,0°C. Лимит потепления принят на Копенгагенской международной конференции по изменению климата в 2009 г. равным 2,0°C. При этом концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере не должна превышать 450—550 ppm, что возможно достичь при сокращении среднего ежегодного прироста выбросов углерода до 3,3 Гт, или вдвое по сравнению с уровнем 2000 г. (6,61 Гт)<sup>1</sup>.

Наиболее фундаментально эта почти критическая ситуация исследована академиком А. А. Акаевым в работе «Стабилизация климата земли в XXI веке путем стабилизации душевого энергопотребления»<sup>2</sup>. С использованием метода сценарного долгосрочного прогнозирования глобального потепления показано, что *возможна стабилизация климата Земли путем перехода на новую парадигму энергопотребления*. Новая парадигма энергопотребления сводится к стабилизации душевого энергопотребления во всех странах мира с различным дифференцированным нормативом для различных стран.

Сворачивание топливной энергетики приведет к росту производства ядерной энергии. В журнале «Успехи физических наук» за 1977 г. академик П. Л. Капица подчеркивал, что если бы энергетический кризис начал возникать задолго до того, как наукой был открыт новый источник энергии, то «человечество, несомненно, стояло бы перед катастрофой, а человеческая культура зашла бы в тупик».

Однако здесь есть свои проблемы. В теоретическом плане важно отметить, что пока не ясно, в каких размерах и при каких условиях допускает второй закон термодинамики использование ядерного топлива. Поэтому жизненно необходимы энтропийные оценки пределов ядерного производства в условиях Земли. Проблема оценок очень сложна и неизвестно, когда будет решена.

Но и без энтропийных оценок проблему можно представить так:

- 1) рост количества реакторов увеличивает вероятность крупных аварий типа Чернобыля;
- 2) даже без аварий в принципе не решена проблема захоронения радиоактивных отходов.

---

<sup>1</sup> Акаев А. А. Стабилизация климата земли в XXI веке путем стабилизации душевого энергопотребления. М. : Научный эксперт, 2012.

<sup>2</sup> Там же.

Количество отходов стремительно растет, в них множество различных изотопов с широким диапазоном периодов полураспада, которые могут достигать десятков тысяч лет. При постоянно происходящих природных катаклизмах непрерывно растет вероятность рассеивания радиоактивности в биосфере с ее уничтожением. Энтропия ее при этом, естественно, возрастет. Плюсом атомной энергии является то, что для нее не нужен кислород.

## **1.18. 0 принципиальной возможности выхода из кризиса**

Каков же выход из создавшейся ситуации? На принципиальную возможность выхода указывают законы термодинамики. Необходимо сначала остановить катализируемый человеком рост энтропии биосферы и затем вернуть ее в состояние с постоянным уменьшением энтропии.

Конкретизируем, как же это можно сделать: с помощью использования *солнечной энергии*.

Действительно, только поток солнечной энергии обеспечивает понижение энтропии биосферы. Поэтому, если использовать только его, то учитывая, что КПД использования всегда будет меньше единицы, человеку никогда не удастся создать встречный поток роста энтропии, который по модулю был бы больше, чем понижение энтропии за счет Солнца. Проще говоря, человеку нельзя переходить граничные возможности системы. И границей является величина потока солнечной энергии.

Итак, использование только солнечной энергии гарантирует уменьшение энтропии, а следовательно, и прогрессивную эволюцию биосферы. Необходимо постоянное увеличение доли солнечной энергии.

Использование солнечной энергии — это не только солнечные электростанции. Это может быть и сжигание древесины, но только той, которая выросла в текущем году. Это и использование ветряных электростанций, так как ветер возникает опять же за счет воздействия солнца. Это и гидроэлектростанции — тоже энергия солнца.

Это могут быть и принципиально новые типы тепловых машин, еще не разработанные наукой. Например, можно использовать разницу температур между нагретым солнцем верхним слоем океанских вод и холодными глубинными массами для работы больших тепловых машин.

Необходимы целенаправленные действия в двух направлениях: повышение эффективности использования энергии и использование возобновимых источников на основе солнечной энергии. Современные технологии в принципе позволяют существенно продвинуться по обоим направлениям.

Например, флюоресцентная лампа может обеспечить то же количество света, что и лампа накаливания при сокращении потребляемой энергии в четыре раза. Есть оценки, что оборудование окнами из специального стекла с малой теплоотдачей всех зданий США позволит сэкономить энергии в два раза больше, чем производится сейчас за счет нефти Аляски. Автомобильные компании уже создали прототип модели автомобиля, способного проехать от 30 до 60 км на 1 л газа. Обсуждается возможность создания транспортного средства, расходующего 1 л топлива на 70 км.

Технический прогресс в области прямого использования солнечной энергии также довольно оптимистичен. В 1970 г. капитальные затраты на производство 1 Вт фотоэлектричества составляли 150 долл., а к 1990 г. они снизились до 4,5 долл. При сокращении издержек еще в три—четыре раза этот источник будет конкурировать с угольной электростанцией.

Результаты исследований, проведенных для Министерства энергетики США, показывают, что в ближайшие 40 лет США смогут получать 57—70% потребляемой в настоящее время энергии за счет солнца, ветра, воды, геотермальных источников и биомассы. Поскольку по меньшей мере половина всей производимой на сегодняшний день энергии в этой стране может быть сэкономлена путем повышения эффективности ее использования, то вполне вероятно будущее, в котором всю энергию будут обеспечивать возобновимые источники.

Однако необходимо отметить, что возобновимые источники энергии не безвредны для окружающей среды и не беспредельны. Ветроэнергетические установки требуют земельных участков. Некоторые виды солнечных батарей содержат токсичные материалы. Плотины гидроэлектростанций способствуют затоплению земель и нарушают естественное течение рек. Ряд солнечных установок имеет малую мощность и работает с перерывами; им необходимы большие площади для улавливания света и сложные механизмы для накапливания энергии.

Принципиальная возможность выхода из глобального кризиса имеется, но особую остроту приобретает вопрос о допустимом пределе роста системы. К сожалению, существуют оценки, свидетельствующие о переходе этого допустимого предела, и мы не можем об этом не сказать.

## **1.19. Предел антропогенного воздействия на биосферу**

Важнейшим параметром воздействия на биосферу является антропогенная доля потребления продукции биосферы. Известно, что в доиндустриальную эпоху эта доля никогда не превышала 1%. Предполагают, что биосфера может компенсировать возмущения, производимые человеком, доля потребления которого не превышает указанного 1% продукции биосферы. Однако этот порог давно превышен.



Ученые Стэнфордского университета установили, что на удовлетворение потребностей человека идет 25% продуктов фотосинтеза, произведенных на Земле в целом (на суше и в океане), и 40% — произведенных на суше. При этом 3% чистой первичной продукции человек потребляет непосредственно, в виде пищи, корма для животных и топлива, а 36% используется косвенно — в результате потерь урожая, сжигания и сведения лесов, опустынивания и превращения природных ареалов в места обитания человека. Ясно, что потребляя такую огромную долю, человек забирает ее у других видов, нанося мощный удар по биосфере.

Эти оценки согласуются, по порядку величины, с оценками наших специалистов. Так, в заслуживающей самого серьезного изучения книге «Проблемы экологии России», написанной 10 известными учеными (К. С. Лосев и др.), отмечается, что современная доля антропогенного потребления продукции биосферы на порядок больше допустимого значения в 1%. Естественно, авторы ставят два важнейших вопроса.

1. Вышла ли в настоящее время биосфера необратимо из устойчивого состояния или она может еще вернуться в прежнее устойчивое состояние?

2. Существует ли другое устойчивое состояние биосферы, в которое она может перейти при дальнейшем росте антропогенного возмущения?

На оба вопроса даны ответы.

1. Современное состояние биосферы обратимо, биосфера должна вернуться в прежнее устойчивое состояние *при сокращении антропогенного возмущения на порядок величины.*

2. Другого устойчивого состояния биосферы не существует, и при сохранении или росте современного антропогенного возмущения устойчивость окружающей среды будет разрушена.

## 1.20. Тенденции сегодняшнего дня

Анализ новейших данных и тенденций с помощью глобальных компьютерных моделей также приводит к выводу, что окружающая среда не может выстоять, общество вышло за пределы. Если никакой коррекции не будет сделано, *«коллапс в той или иной форме не только возможен, но и неизбежен и может наступить еще при жизни сегодняшнего поколения»* (Д. Медоуз и др., 1994 г.). Сами авторы содрогаются от такого вывода, называя его чудовищным. Но в книге «За пределами роста» детально показывается, как они к нему пришли.

Полезно проследить, как развивались и развиваются события после грозного предупреждения в «Пределах роста».

На рис. 5 и 6 приведены две экспоненты — роста численности населения и роста концентрации диоксида углерода в атмосфере, образующегося при сжигании ископаемого топлива. *В 2017 г. концентрация диоксида углерода достигла рекордного и опасного уровня 410 частей на миллион* (в доиндустриальную эпоху было 280 частей на миллион). Обратим внимание, что после 1972 г. человечество ни на йоту не изме-



нило своих тенденций. Но все мы хорошо помним, что говорят глобальные модели, если прежние тенденции не изменятся. И уже на рис. 7 видим одно из следствий.

При общем росте объема промышленного производства в мире почти по экспоненте (сплошная кривая) рост производства на душу населения практически остановлен (пунктирная кривая). По состоянию на 2017 г. анализ множества данных позволяет утверждать, что тенденция отставания от общего объема промышленного производства на душу населения сохраняется.

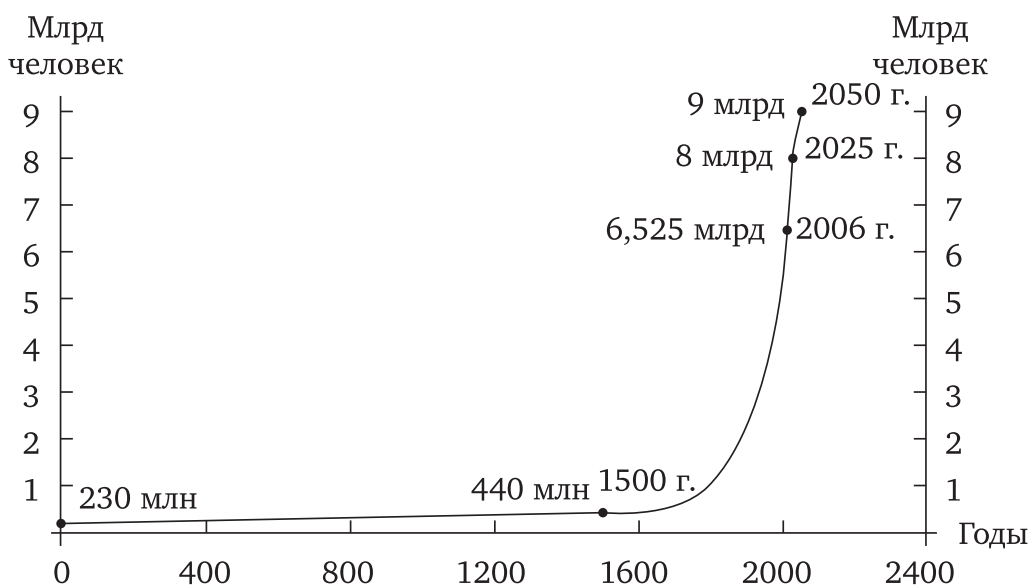


Рис. 5

Площадь обрабатываемых земель за 20 лет уменьшилась, так как темпы сокращения пахотных земель из-за эрозии, засоления, опустынивания и урбанизации опережают темпы освоения новых земель. За пять лет (1985—1989 гг.) объем производства пищевых продуктов на душу населения сократился в 94 странах. Сейчас ежедневно от голода или плохого питания умирает 35 000 чел., большинство из них дети (13 млн в год). Хронически голодает 500—1000 млн чел.

Темпы уничтожения тропических лесов иначе как лихорадочными просто не назовешь. Ежегодно вырубается около 17 млн га. Есть две оценки: если уничтожение будет идти экспоненциально, то леса исчезнут через 30 лет; если уничтожение пойдет по линейному закону, т.е. сегодняшними темпами по 17 млн га в год, то исчезновение лесов произойдет через 47 лет.

Непросто оценить темпы уничтожения различных форм жизни. Но можно. Считается, что на Земле существует от 10 млн до 100 млн различных форм жизни. Из них только 1,4 млн классифицированы и поименованы. Никто даже приблизительно не знает, сколько их уже утрачено. Но почти наверняка можно сказать, что число вымерших видов возрастает экспоненциально. Этот вывод следует из темпов исчезновения мест их обитания. Приведем два примера.

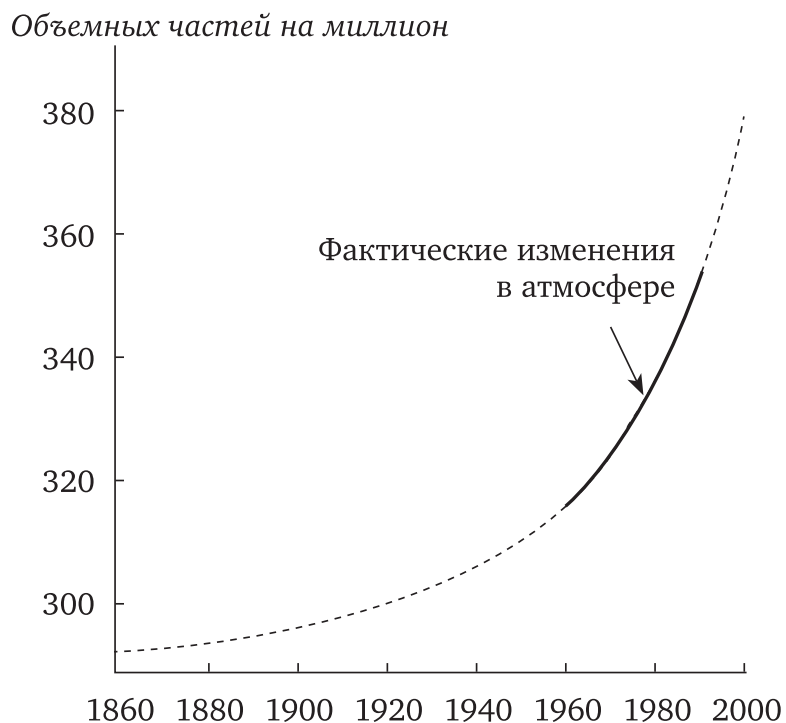


Рис. 6

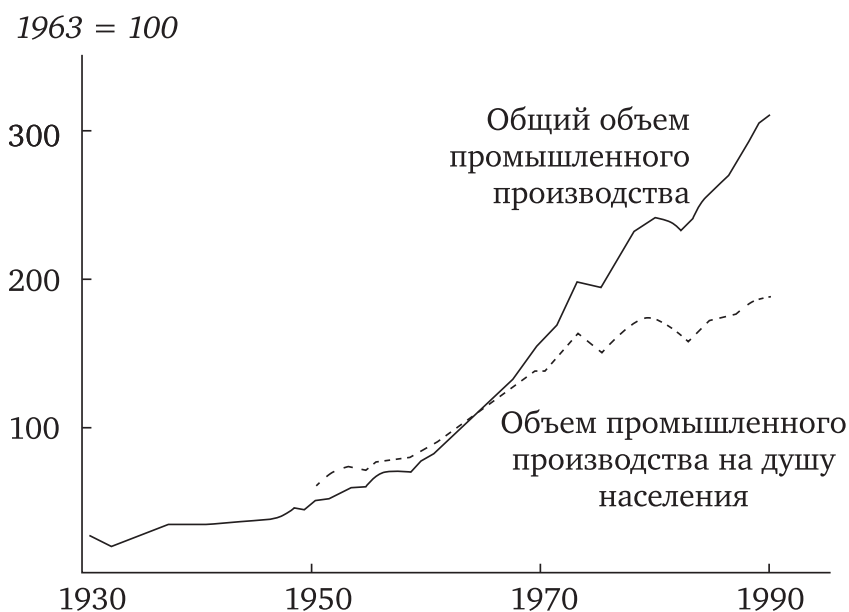


Рис. 7

1. В лесах Мадагаскара обитает 12 тыс. известных видов растений и 190 тыс. известных видов животных, 60% которых нигде больше не встречается. Эти леса уничтожены более чем на 90%. Исчезло, по оценкам ученых, не менее половины всех видов.

2. В Западном Эквадоре произрастало 8—10 тыс. видов растений (50% только здесь). Каждый вид поддерживал 10—30 видов животных. После 1960 г. почти все леса были превращены в банановые плантации, нефтяные разработки и населенные пункты. В результате за 25 лет исчезло 50 тыс. видов.

На всей Земле, по приближенным оценкам, ежедневные потери составляют от 10 до 100 видов. На Земле не было такого всплеска вымирания видов уже 65 млн лет.

Стремительно исчезают и невозобновимые ресурсы. Разведанных запасов нефти, по прогнозу 1989 г., хватит на 41 год, газа — на 60 лет, угля (антрацита) — на 326 лет. Уповать на уголь, однако, не следует из-за быстрого ухудшения состава земной атмосферы. В 2017 г. за счет разведанных запасов ситуация немного лучше, но нефть в большинстве стран заканчивается в ближайшие десятилетия. Современные концентрации диоксида углерода и метана намного превышают те их значения, которые были 160 тыс. лет назад.

Весьма близким глобальным пределом является тепловое загрязнение, или «парниковый эффект». «Парниковых» газов несколько. Всем известен диоксид углерода, который пропускает солнечную энергию внутрь атмосферы, но препятствует ее выходу обратно. Такой же парниковый эффект дают и метан, и оксиды азота, и хлорфторуглеводороды (известные, кроме того, как уничтожители озонового слоя стратосферы). Объемы выбросов в атмосферу всех этих газов в результате деятельности человека непрерывно и быстро (по экспоненте) растут. В результате уже сейчас имеем явное потепление климата.

На рис. 8 приведена динамика глобального потепления (по данным НАСА). Жирной линией показано изменение средней температуры за пять лет. Видим четкое потепление. Длительное изучение канадских озер показывает, что свободный ото льдов сезон вырос на три недели. По данным спутников, уменьшаются снежные покровы в Северном полушарии.

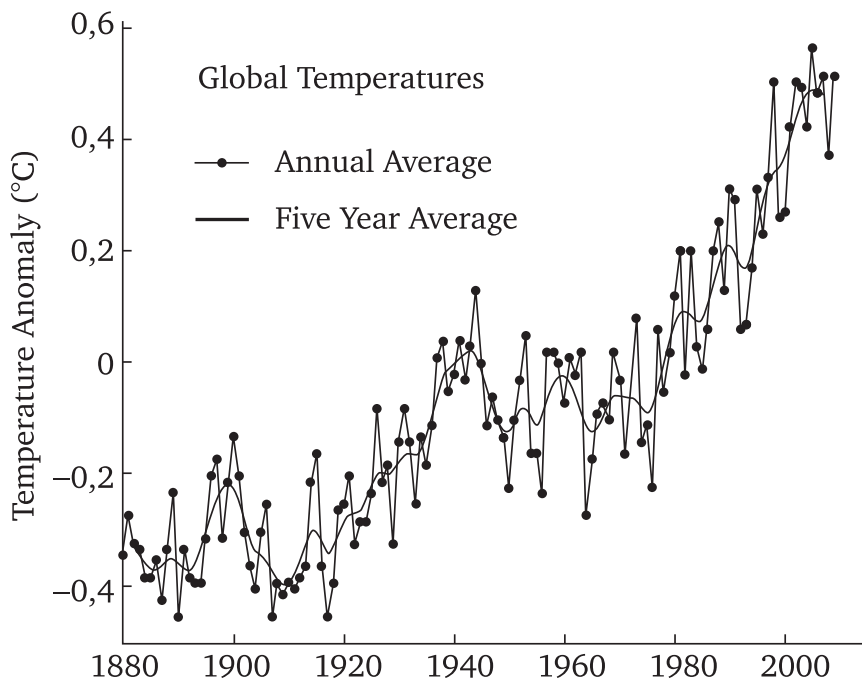


Рис. 8<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Annual Average — среднегодовое значение температуры, Five Year Average — среднее за пять лет.

По данным ЮНЕП (доклад ГЕО-4, 2007 г.), за последнее столетие зафиксировано увеличение среднегодовой температуры на 0,74°C. Эта тенденция, в соответствии с которой *11 из 12 последних лет (1995—2006 гг.) входят в 12 самых теплых лет с 1850 г.*, проявляется достаточно ярко. Летний ледовый покров Арктики уменьшается за десятилетие на 8,9%. При этом средняя температура в Арктике поднимается в два раза быстрее, чем в среднем в мире, и основной рост произошел за последние 20 лет.

По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), к концу этого века повышение среднегодовой температуры составит 1,8–4°C.

С удовлетворением отметим, что в 2015 г. на конференции по климату в Париже было принято соглашение о мерах противодействия. Соглашение подписали 192 страны, и оно вступило в силу 4 ноября 2016 г. Главной целью соглашения является стремление ограничить рост глобальной температуры намного ниже 2°C.

*«Нынешний уровень рождаемости детей с генетическими повреждениями достигает 17%. Простая интерполяция роста генетических повреждений показывает, что если этот процесс и дальше пойдет такими же темпами, то для вымирания людей потребуется всего лишь несколько поколений, так как генные повреждения у 30% особей популяции приводят ее к гибели»* (И. В. Ильин, А. В. Иванов, 2009).

Состояние земной атмосферы далеко от равновесного и продолжает ухудшаться по экспоненте. Вероятно возникновение и дестабилизирующих контуров положительной обратной связи, когда повышение температуры будет приводить к дальнейшему ее росту. Например, по мере потепления уменьшается снежный покров, земная поверхность отражает меньше солнечной энергии и, следовательно, нагрев усиливается. Оттаявшие почвы тундры могут высвободить огромные количества замороженного (в виде гидрата) метана, что приведет к еще большему потеплению, дальнейшему оттаиванию почв и выделению еще большего количества метана.

### Хранилище «Судного дня»

Из-за постоянно ухудшающейся ситуации в биосфере в Норвегии под эгидой ООН построено Всемирное семеновохранилище на Шпицбергене. Согласен с предложением. Финансировали проект, общая стоимость которого 9 млн долл., правительство Норвегии и частные предприниматели, например Билл Гейтс. Туннель-хранилище находится на 120-метровой глубине и на высоте 130 м над уровнем моря. Сохранность посадочного материала всех сельскохозяйственных растений обеспечивают холодильные камеры и вечная мерзлота. Собственный отсек в этом банке растений получили все страны. Задача хранилища семян — *не допустить их уничтожения в результате возможных глобальных катастроф*, таких как падение астероида, ядерная война или глобальное потепление.

В 2008 г. в хранилище содержалось 250 тыс. различных семян, а всего в него можно поместить до 3 млн семян.

Россия активно включилась в процесс сохранения генетического материала. ЮНЕСКО поддержало российский проект по созданию мирового криохранилища семян растений в вечной мерзлоте на территории Якутии. Условия здесь заметно лучше, так как не требуется внешнего источника энергии, температура стабильна на уровне  $-7\dots-10^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, при потеплении на  $5^{\circ}\text{C}$  ледники на Шпицбергене растают, и хранилище будет работать на холодильнике, а в Якутии, чтобы растаяла вечная мерзлота, нужно потепление примерно на  $20^{\circ}\text{C}$ !

С удовлетворением отметим, что первая очередь хранилища на 100 тыс. семян сельскохозяйственных, редких и исчезающих видов растений уже построена. Определены участки по строительству второй очереди, которая рассчитана на размещение 1 млн семян.

---

*Загрязнение среды продолжает быстро нарастать*, а надежды на всякого рода очистку от загрязнений разбиваются об экономическую преграду. Например, за 20 лет в США было истрачено более 100 млрд долл. только на создание установок по очистке сточных вод. А каков эффект? Качество воды осталось, в среднем, прежним, потому что содержание органических соединений в сточных коммунальных водах хотя и снизилось в два раза, но в два раза увеличилось количество этих вод. Ясно, что подобные затраты на очистку для большинства стран нереальны.

Труднее всего обезвреживать ядовитые *химические соединения, синтезированные человеком*. Они никогда не существовали в природе, поэтому нет и организмов, способных их разрушить и обезвредить. В настоящее время в коммерческом обороте находится 65 тыс. промышленных химических веществ. Менее 1% из них имеют изученные токсикологические характеристики. Ежедневно на рынке появляется три—пять новых химических соединений, и 80% из них не проходят испытаний на токсичность. Каждый день на Земле производится 1 млн т опасных отходов.

Ознакомимся подробнее с таким загрязнителем, как плутоний.

## 1.21. Плутоний

Осенью 1994 г. небольшим тиражом (1000 экз.) вышла книга группы авторов под руководством члена-корреспондента РАН А. В. Яблокова «Плутоний в России». Предельно кратко необходимо сказать следующее. *Плутоний до того, как его начали получать в ядерных реакторах, практически отсутствовал в природе (несколько десятков килограммов в доступном для человека слое поверхности планеты), но однажды произведенный, остается в ней сотни тысяч лет*. За последние 50 лет тонны плутония (от 7 до 10 т) выброшены в атмосферу в результате ядерных взрывов, и огромное количество его вместе с радиоактивными отходами попало в реки, озера, моря и под землю. Сотни тонн плуто-



ния содержатся в ядерном оружии и отработавшем топливе атомных электростанций.

Плутоний — в высшей степени опасное радиоактивное вещество. Даже просто рассеянные в окружающей среде частички плутония несут неисчислимые беды человечеству и всей живой природе. Плутония, уже имеющегося только на территории России, хватит для многократного отравления всего населения Земли даже без ядерных взрывов.

Более 50% попавшего внутрь человеческого организма плутония откладывается в костной ткани и практически не выводится: период полувыведения составляет 50—100 лет. В печени откладывается до 30% плутония. Здесь период полувыведения около 20 лет.

Наибольшая опасность плутония для человека связана с его способностью вызывать злокачественные опухоли. Можно сказать, что плутоний является сильным канцерогеном.

Более 99% поступившего в окружающую среду плутония содержится в поверхностных слоях почвы и донных отложениях. Перераспределение соединений плутония на поверхности Земли происходит в основном за счет ветрового переноса и эрозии почвы.

В настоящее время плутоний определяется в пробах почвы, воздуха, растений, в органах и тканях человека и животных практически во всех регионах земного шара, так что можно уже говорить о круговороте плутония в природе. Это надолго, потому что основная доля плутония в природе приходится теперь на изотоп  $Pu^{239}$ , период полураспада которого более 24 тыс. лет. По имеющимся в литературе данным можно сделать вывод о росте содержания плутония в организме человека.

## 1.22. Генетически модифицированные продукты

В 2007 г. в Москве обнародованы данные исследований аспирантки Саратовского аграрного университета М. Коноваловой на двух поколениях мышей. Первое поколение питалось генетически модифицированным белком сои. У мышей с рационом, включавшим всего 10% генетически модифицированного (ГМ) корма, наблюдалось увеличение массы тела и внутренних органов. Были отмечены явные уродства и отклонения в развитии мышат, матери которых употребляли ГМ-соя. Но самое страшное — была отмечена невероятная агрессивность самок по отношению к потомству: матери душили своих детенышей.

Президент Общенациональной ассоциации генетической безопасности (ОАГБ) Александр Баранов отмечает, что ГМ продукты впервые разработаны американской компанией «Monsanto» («прославившейся» производством печально известного дефолианта «Agent Orange», примененного во время войны во Вьетнаме в 1970-е гг.) всего 20 лет назад. Их широкое распространение в США за такой короткий срок способствовало беспрецедентным масштабам ожирения и лишнего веса у жителей — проблема, признанная властями США и имеющая масштаб национального бедствия.

16 февраля 2007 г. в Российском химико-технологическом университете им. Д. И. Менделеева в Москве состоялась лекция профессора Дениса Медоуза. На вопрос о его отношении к генетически модифицированным культурам Медоуз ответил: «Что касается ГМО, я могу сказать следующее. Возникают такие проекты, как, например, модификация хлопчатника, в геном которого встраивают чужеродный ген, позволяющий ему самостоятельно производить инсектицид, отпугивающий вредителей, или например, создается коза, в геном которой встроен ген паука с целью получения шелка.

Это очень сложный вопрос и обычно я не люблю давать простые ответы на сложные вопросы, но в данном случае я обязан сказать: *это должно быть полностью остановлено*. Прежде всего, потому, что мы не понимаем и никогда не понимали систему, в которой живем. При этом мы производим в системе, законы развития которой не понимаем, такие глобальные изменения. Люди просто нашли очередной способ получения прибыли для себя. Однако даже в случае, если бы они были очень внимательны, обеспокоены вопросами безопасности и никогда не сделали ни одной ошибки и чего-нибудь достигли, вряд ли нам всем от этого была бы польза. Но они делают ошибки! *Генетические ресурсы нашей планеты формировались миллионы лет. Люди вдруг решили, что за полгода или год они поймут, как внести во все это свои исправления. Это безумие*. Мы можем нарушить природный баланс.

*ГМО невозможно контролировать*. Например, если на одной ферме выращиваются ГМ-растения, то очень скоро поля соседних фермеров, выращивающих традиционные аналоги, будут загрязнены, и проблемы возникнут уже у всех.

Я крайне критически отношусь к генетической модификации. Это еще один пример того, как люди пытаются решить проблемы, которые имеют социальный и культурный базис, с помощью технологии. Люди пытаются найти некое волшебное средство. Корень проблем — в нашем обществе. Решать их при помощи технологии — большая ошибка».

### **1.23. Современные глобальные прогнозы**

Проведем краткий анализ возможного хода событий, предсказываемый группой профессора Д. Медоуза с помощью компьютерной модели «МИР-3» («За пределами роста», 1994).

На рис. 9 показано поведение «реалистичной» модели на основе имеющихся тенденций без особых изменений в технике или политике. Это есть исходный сценарий, или *Сценарий 1*, как его называют авторы. Они отмечают, что это не обязательно самый вероятный прогноз.

Верхняя картинка называется «Состояние мира». Здесь известные нам пять переменных: население, ресурсы, промышленное производство, сельскохозяйственное производство и загрязнение. Изучается период в 200 лет: от 1900 до 2100 г.

Нижняя картинка — качество жизни. Здесь четыре кривых: продолжительность жизни, производство промышленных товаров, продуктов питания и объем услуг на душу населения

Числовые данные для указанных девяти переменных на всех графиках отсутствуют, так как их точные значения в каждый момент времени не столь важны. Главное — как при переходе от одной гипотезы к другой меняется характер кривых. Например, исчезает коллапс или нет, сдвигается ли он и куда.

Что же произойдет по реалистичному варианту? В 1990 г. производство промышленной продукции на душу населения 260 долларов в год (в среднем). Объем производства продуктов питания с 2015 г. начнет падать (на душу падает уже сейчас, а с 2015 г. возрастет скорость падения, что и наблюдается).

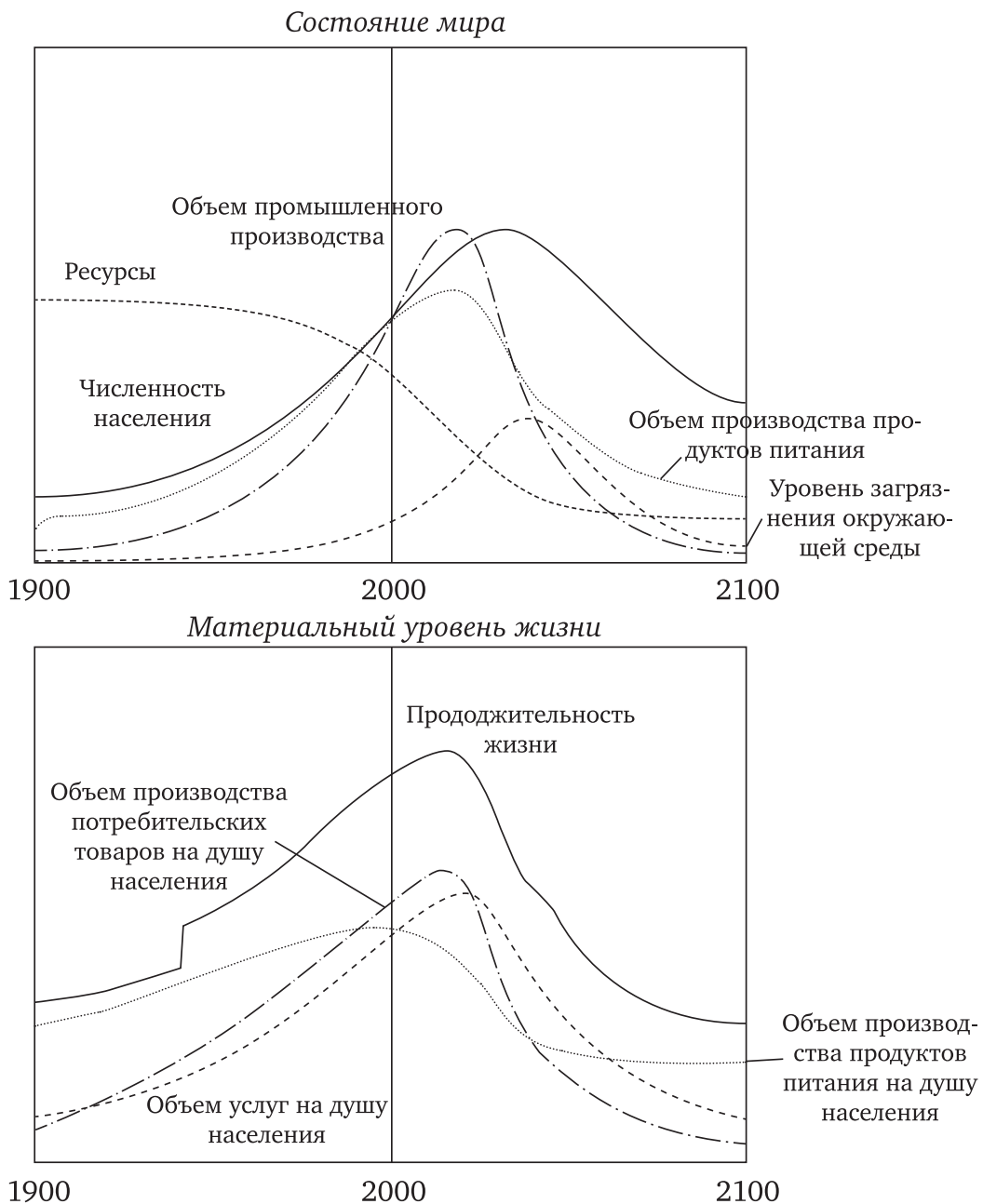
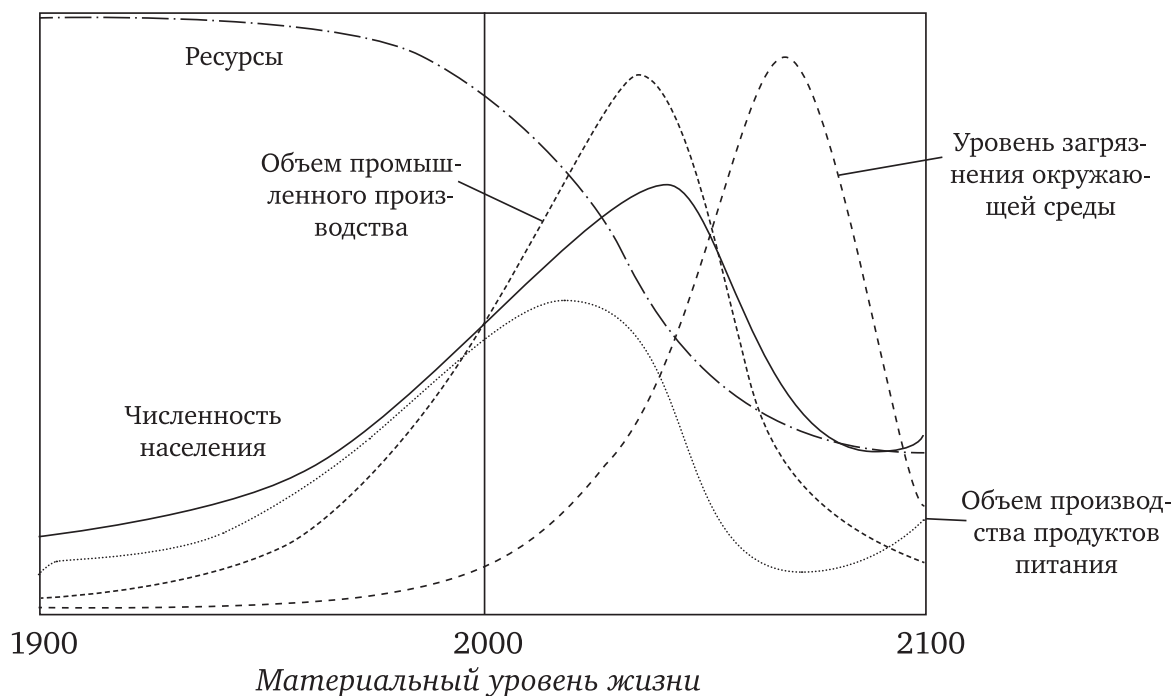


Рис. 9

### Состояние мира



### Материальный уровень жизни

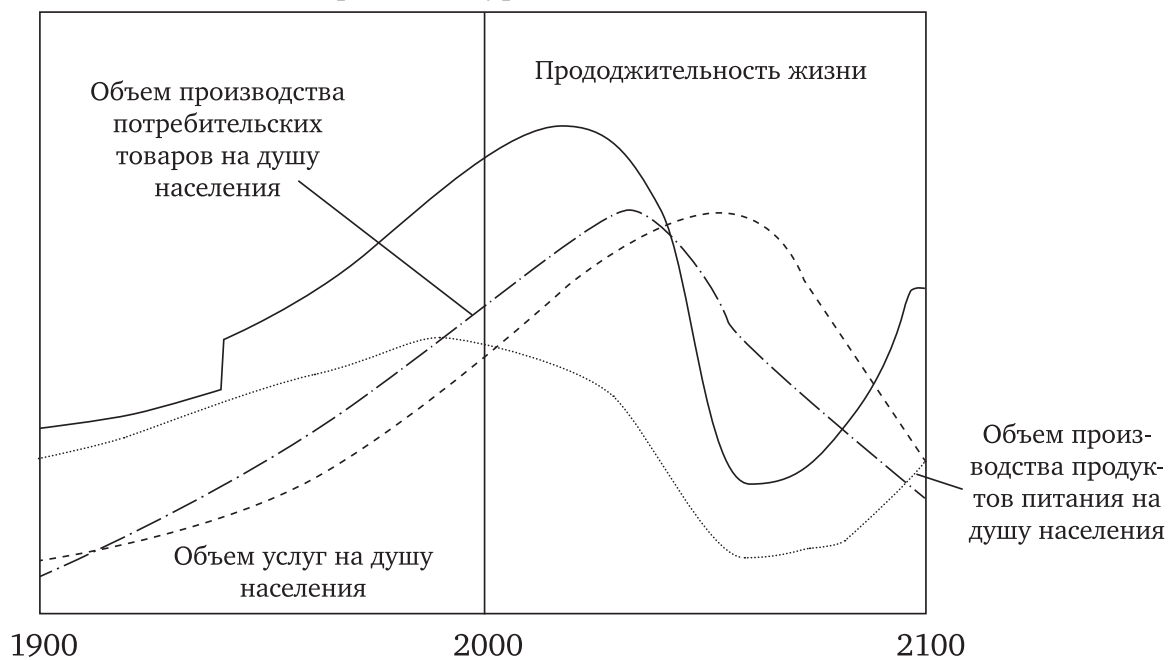


Рис. 10

К 2020 г. невозобновимых ресурсов останется только на 30 лет, а население вырастет в 1,5 раза. За первые 20 лет следующего века человечество использует столько же невозобновимых ресурсов, сколько глобальная экономика за все предыдущее столетие.

Поскольку и продовольствие, и ресурсы становятся все недоступнее, капитал все сильнее отвлекается на их производство и добычу и нет средств на решение других проблем, В конце концов численность населения тоже начинает снижаться из-за уменьшения продуктов питания и услуг здравоохранения. Это и есть *коллапс*. Посмотрите на кривую продолжительности жизни, насколько резко и глубоко она падает.

Отметим, что так будет не обязательно. Так будет, если сегодняшние тенденции не изменятся.

Поищем какие-нибудь спасительные идеи. Компьютерная модель позволяет проверить их очень много.

Например, пусть *неразведанные запасы невозобновимых ресурсов окажутся вдвое больше* по сравнению с предполагаемыми. Результат видим на рис. 10. Тот же самый коллапс. Причем, обратите внимание, какая кривая больше всего выигрывает здесь, — это загрязнение среды. Максимум достигается позже на 30 лет, но он *втрое* выше, чем в сценарии 1. Загрязнение среды является главной причиной резкого снижения плодородия земли.

Отметим, что *в тысячах компьютерных расчетов, проведенных Медоузом за многие годы, выход за пределы и коллапс были наиболее часто встречающимся результатом.*

Есть ли какие-либо важные факторы, которые не учитывает модель «МИР-3» и которые могут влиять на сроки наступления коллапса? Есть. В модели «МИР-3» нет военного сектора, выкачивающего капитал и ресурсы из производственного сектора. Здесь отсутствуют войны, разрушающие капитал и земельные ресурсы или производящие загрязнения. Нет в ней и гражданских беспорядков, забастовок, коррупции, наводнений, землетрясений, извержений вулканов, Чернобылей, эпидемий СПИДа и т.д. Поэтому *модель чересчур оптимистична.* Ее прогнозы могут отражать наиболее благоприятные пути развития реального мира.

Итак, мы выяснили, что главной причиной выхода за пределы является рост населения. Логично проанализировать возможность выхода из кризиса с помощью преднамеренного ограничения роста населения. Разумеется, Медоуз не упустил возможности такого анализа. Сценарий 8 называется «Модель мира при принятии в 1995 г. программы стабилизации численности населения».

Предполагается, что весь мир осознает важность ограничения роста населения и средний размер семьи добровольно ограничен двумя детьми, причем эффективность контроля над рождаемостью после 1995 г. составляет 100%. В результате темп роста населения снижается, но вследствие инерции, обусловленной возрастной структурой населения, в 2000 г. его численность достигла 6 млрд человек, в 2011 г. — 7 млрд. Что при этом происходит, видим на рис. 11. Тот же коллапс.

Основные причины — рост промышленного производства и загрязнение среды. Объем производства растет быстрее и достигает более высокого уровня, чем в сценарии 2, потому что здесь больше свободного капитала, который можно направить на эти цели. Ну а росту производства сопутствует рост загрязнения, что приводит к снижению урожайности.

Максимальный уровень производства в данном случае достигает 500 долл. в год на душу населения, т.е. в 2 раза больше, чем в 1990 г.





2) предполагается, что любая новая технология, ведущая к уменьшению загрязнения окружающей среды, разрабатывается и внедряется в течении всего лишь 20 лет;

3) принимается решение увеличить производство сельскохозяйственной продукции до уровней, превышающих те, которые обеспечиваются уже известными технологиями (т.е. используются всяческие открытия, например, в генной инженерии и т.п.).

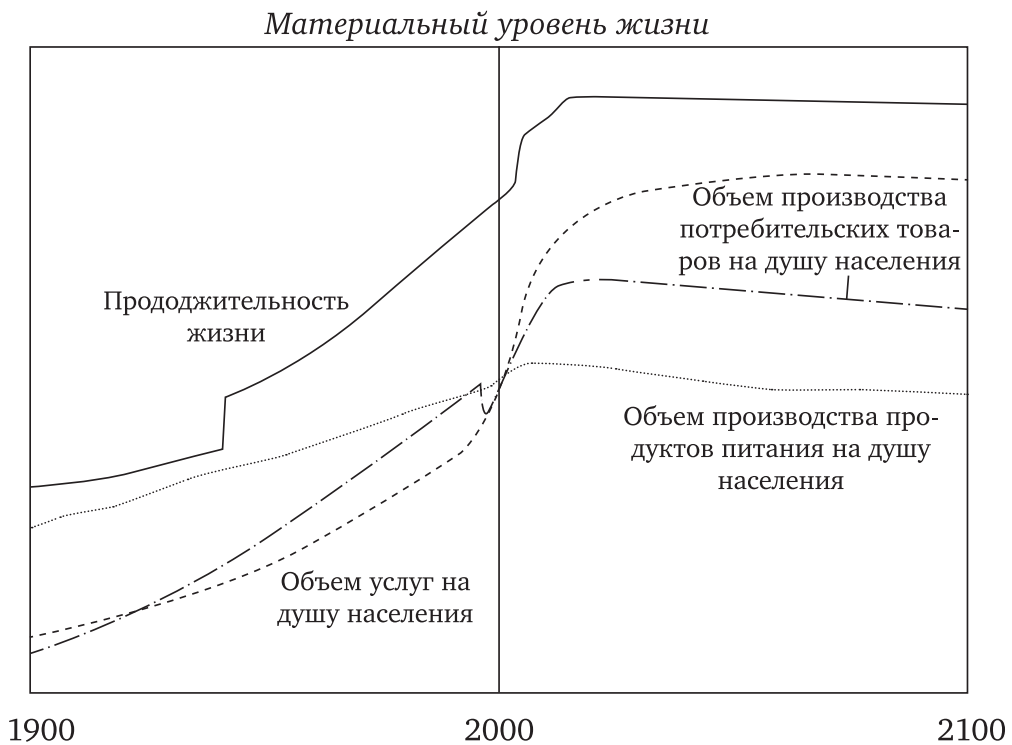
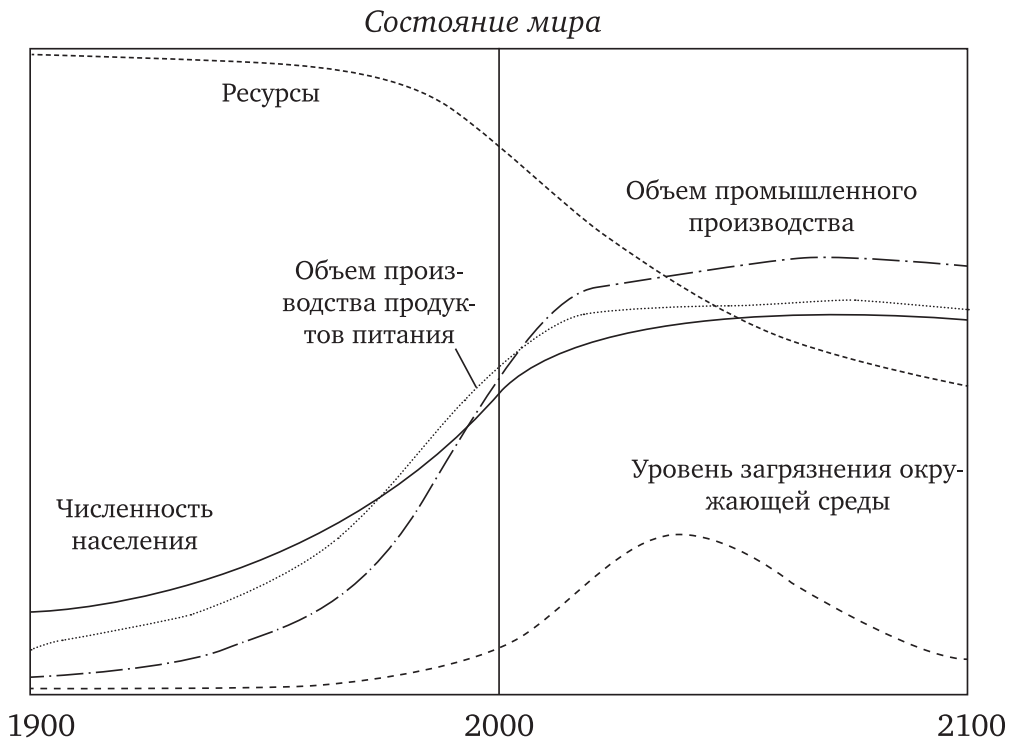


Рис. 12

На это также выделяются средства. И так далее. Имеется в виду, что все самые современные технологии и в промышленности, и в сельском хозяйстве внедряются по всему миру. На рис. 12 видим результат. Коллапса нет. Нормальными условиями жизни обеспечивается население Земли в 7,7 млрд чел.

В последней книге Донеллы Медоуз, Йоргена Рандерса и Дениса Медоуза «Пределы роста. 30 лет спустя», вышедшей в русском переводе в 2008 г., в целом подтверждены основные выводы их предыдущих работ. Но появилась и новая серьезная нотка: «...сегодня мы оцениваем перспективы развития мира гораздо пессимистичнее, чем в 1972 г. Грустно, но факт: *человечество впустило потратило целых 30 лет, обсуждая не те проблемы, что нужны*, и принимая слабые, нерешительные меры по защите окружающей среды. У нас нет других 30 лет, так что проявлять нерешительность просто некогда: слишком многое нужно изменить, чтобы сегодняшней выход за пределы уже в XXI в. не привел к глобальной катастрофе».

В апреле 2012 г. Д. Медоуз прочитал лекцию в Московском государственном университете с символическим названием: «Уже слишком поздно для устойчивого развития». На ежегодной ассамблее Римского клуба в Бухаресте (Румыния, 1—2 октября 2012 г.) Д. Медоуз в своем докладе еще более пессимистичен, описывая перспективу цивилизации. Он полагает, что уже поздно менять траекторию движения, мир продолжает ускоренно двигаться в катастрофу, поэтому Римскому клубу и его национальным отделениям надо приступить к обсуждению того, какие разумные меры можно успеть предпринять, чтобы уменьшить масштаб воздействия катастрофы на конкретные страны, города, сообщества людей.

## 1.24. *Homo sapiens* или ...?

Как известно, человек красиво назвал себя *Homo sapiens* — человек разумный. Но известно также, что никто этого названия не утверждал — на естественнонаучном горизонте не видно достойного рецензента. Человеку еще предстоит это доказать и, желательно, делами. А дела в последние десятилетия говорят о сходстве поведения человечества с известным существом, прячущим от опасности свою разумную голову в песок. Так может быть мы не *Homo sapiens*, а *Homo strausino*?

Теперь ясно, где у генетиков наиболее перспективная тема исследований.

## 1.25. 0 переходе к устойчивой системе

Вероятность реализации последнего сценария (см. рис. 12) оценить сложно. Важно, однако, что в принципе устойчивое общество воз-

можно. Но при одном условии: необходимо срочно, немедленно изменить имеющиеся тенденции, которые, несомненно, ведут к краху. Причем некоторые требующиеся изменения настолько непривычны для человечества, например ограничение роста промышленного производства на определенном уровне, что авторы называют переход к обществу устойчивого развития революционным.

Конечно, никто не знает, как осуществить такую революцию. Нет и не будет готовых рецептов типа: «Чтобы произошла глобальная революция, следуйте нижеперечисленным 20 пунктам». Она не поддается планированию или диктату. Но на основе опыта работы в области системного анализа авторы приходят к выводу о существовании двух свойств сложных систем, важных для такой революции.

1. *Ключом к преобразованиям является информация.* Это не обязательно означает более интенсивный ее поток. Это означает, что информация должна распространяться новыми путями, к новым потребителям, нести новое содержание и формулировать новые правила и цели (которые сами по себе являются информацией). Обладая различной информационной структурой, система неизбежно будет вести себя по-разному. Например, политика гласности, простое открытие информационных каналов обеспечили быстрые изменения в Восточной Европе. Старая система держалась на жестком контроле над информацией.

2. *Системы яростно сопротивляются изменениям в информационных потоках, особенно в потоках правил и целей.* Существующая система может практически полностью ограничить попытки отдельной личности действовать по другим правилам и руководствоваться другими целями, отличными от дозволенных системой. Однако только отдельные личности, ощущая потребность в новой информации, правилах и целях, обсуждая эти проблемы, пробуя их разрешить, могут преобразовать систему.

В поисках путей, способствующих мирному изменению структуры системы, авторы использовали множество способов. Наиболее распространенные из них представлены в книге «За пределами роста». Это — рациональный анализ, статистические данные, системное решение, компьютерное моделирование и самые простые слова, которые только можно подобрать для описания новой информации и новых моделей.

Но авторы отмечают, что эти способы *полезны, необходимы, но не достаточны.* «Мы не знаем, что является достаточным. Но нам хотелось бы завершить книгу, упомянув пять других полезных способов». «Мы испытываем некоторые колебания, приступая к их обсуждению, поскольку не являемся экспертами в этой области и поскольку они требуют слов, которые редко произносятся учеными».

Назовем эти пять способов: предвидение, создание организаций единомышленников, правдивость, обучение и любовь. Кратко поясним, что имеют в виду авторы.

**1. Предвидение.** Устойчивый мир никогда не станет реальностью, если его невозможно представить. Предвидение должно строиться из идей многих людей, прежде чем оно примет законченные и привлекательные формы.

**2. Создание организаций единомышленников.** «Мы не смогли бы выполнить свою работу без организаций единомышленников. Большинство из них являются неформальными». Это просто группы людей, поддерживающие между собой связь, распространяющие данные, методы, идеи и, что самое важное, воодушевление. По определению, сеть этих организаций не обладает иерархией. Это переплетение связей между равными.

**3. Правдивость.** Часто неправда является намеренной. Ее используют для того, чтобы манипулировать, убаюкивать или соблазнять, откладывать принятие мер, завоевывать или сохранять власть или отрицать нежелательные факты.

Для существования системы это может оказаться губительным. Ложь искажает информационный поток. Система не может функционировать, особенно в беспокойное время, если информационный поток запутан и искажен. Один из важных принципов теории систем состоит в том, что информация не должна быть преднамеренно искажена или сокращена, она также не должна запаздывать.

Авторы приводят ряд искажений, упрощений, заблуждений, с которыми они часто сталкивались, обсуждая пределы роста. Приведем важнейшее.

Часто говорят: предупреждение о будущем — это предсказание катастрофы. Совершенно неправильно. Мы с этим решительно не согласны. Правильно так: предупреждение о будущем — это *рекомендация идти другим путем*.

**4. Обучение.** Предвидение, создание организаций единомышленников, распространение достоверной информации — все бесполезно, если не заставляет действовать. Нужно *сделать* довольно много, чтобы построить устойчивый мир. Следует разработать новые методы ведения сельского хозяйства. *Необходимо начать новые виды бизнеса, а прежние пересмотреть с целью сокращения потоков потребляемых материалов и энергии.* Одни законы надо принять, другие отменить. Следует обучать детей и взрослых.

«Как и все люди, мировые лидеры не знают, какие пути ведут к устойчивому обществу. Большинство из них даже не подозревают о такой необходимости. Революция перехода к устойчивому развитию требует, чтобы *каждый человек действовал как обучающийся лидер на своем уровне: от семьи до государства*».

Отметим, что весьма эффективен принцип: мыслить — глобально, действовать — локально.

**5. Любовь.** В современной культуре принято говорить о любви только в наиболее романтическом и тривиальном смысле. Но А. Печ-



чеи, говоря о глобальных проблемах, никогда не забывал отметить в заключение, что решение мировых проблем начинается с «нового гуманизма».

«Гуманизм, созвучный с нашей эпохой... должен обладать способностью возродить в нас... любовь, дружбу, понимание, солидарность, дух жертвенности, общительность».

*Мир никогда не сумеет благополучно преодолеть переход к устойчивому состоянию, если он не будет осуществлен в духе глобального партнерства.*

## Контрольные вопросы и задания

1. Какова роль анализа и синтеза в процессе познания окружающего нас мира?
2. В чем заключается важнейшая цель естествознания?
3. Каков основной метод исследований в естественных науках?
4. Что такое биосфера по теории академика В. И. Вернадского?
5. В чем состоит главная трудность при естественнонаучных исследованиях биосферы?
6. Существует ли возможность преодоления принципиальных затруднений при изучении биосферы?
7. Создает ли деятельность человека угрозу выживанию современной цивилизации?
8. Предупреждали ли ученые-естественники о надвигающейся катастрофе?
9. Что такое мысленные модели и каковы их характерные особенности?
10. Как вы понимаете контринтуитивность поведения социальных систем?
11. В чем заключаются сильные и слабые стороны человеческого ума?
12. Существуют ли возможности преодоления слабых сторон человеческого мышления при естественнонаучных исследованиях динамического поведения сложных систем?
13. Что такое Римский клуб и какова его цель?
14. Каков главный вывод первого доклада Римскому клубу «Пределы роста»?
15. Назовите основные ограничивающие факторы, сдерживающие непрерывный рост мировой системы.
16. Может ли научно-технический прогресс решить все проблемы и устранить надвигающийся коллапс?
17. Есть ли признаки потери устойчивости биосферы?
18. Что может произойти, если будет пройден верхний предел допустимых антропогенных нагрузок на биосферу?
19. Что такое энтропия?
20. Опишите второе начало термодинамики?
21. Наступит ли тепловая смерть Вселенной?
22. В чем суть современного глобального кризиса с точки зрения термодинамики?
23. Приведите некоторые примеры, свидетельствующие о процессах роста энтропии биосферы.
24. Какова принципиальная возможность выхода из глобального кризиса с точки зрения термодинамики?
25. Каковы особенности перехода к обществу устойчивого развития?

## Список использованной литературы

1. Акаев, А. А. Стабилизация климата земли в XXI веке путем стабилизации душевого энергопотребления / А. А. Акаев. — М. : Научный эксперт, 2012.
2. Акимова, Т. А. Основы экоразвития / Т. А. Акимова, В. В. Хаскин. — М. : Изд-во Российской экономической академии, 1994.
3. Алешкевич, В. А. Курс общей физики. Молекулярная физика / В. А. Алешкевич. — М. : Физматлит, 2016.
4. Вернадский, В. И. Биосфера / В. И. Вернадский. — М. : Мысль, 1967.
5. Ильин, И. В. Введение в глобальную экологию / И. В. Ильин, А. В. Иванов. — М. : Изд-во МГУ, 2009.
6. Капица, С. П. Очерк теории роста человечества / С. П. Капица. — М. : Ленанд, 2008.
7. Кузнецов, Г. А. Концепция глобального развития: термодинамические аспекты / Г. А. Кузнецов, В. В. Суриков // Вопросы философии. — 1981. — № 12. — С. 95—102.
8. Лосев, К. С. Проблемы экологии России / К. С. Лосев [и др.]. — М. : Изд-во ВИНТИ, 1993.
9. Медоуз, Д. Х. За пределами роста / Д. Х. Медоуз, Д. Л. Медоуз, Й. Рандерс. — М. : Прогресс, 1994.
10. Медоуз, Д. Х. Пределы роста / Д. Х. Медоуз [и др.]. — М. : Изд-во МГУ, 1991.
11. Медоуз, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2008.
12. Моисеев, Н. Н. Восхождение к разуму / Н. Н. Моисеев. — М. : Фирма коммерческой рекламы и научно-технической пропаганды «ИздАТ», 1993.
13. Национальный доклад СССР к конференции ООН 1992 г. по окружающей среде и развитию. — М. : Республика, 1991.
14. Нелинейная динамика глобальных процессов в природе и обществе / под ред. И. В. Ильина, Д. И. Трубецкова, А. В. Иванова. — М. : Изд-во МГУ, 2014.
15. Одум, Г. Энергетический базис человека и природы / Г. Одум, Э. Одум. — М. : Прогресс, 1978.
16. Олдак, П. Г. Колокол тревоги: пределы бесконтрольности и судьбы цивилизации / П. Г. Олдак. — М. : Политиздат, 1990.
17. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. — М. : Наука, 1978.

## Глава 2

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

### 2.1. Естественнонаучная картина мира. Вселенная. Метагалактика. Галактика

Полная естественнонаучная картина мира создается всей совокупностью естественных наук, поэтому в рамках данного краткого вводного курса возможен разговор лишь о базовых понятиях, структурах и взаимодействиях.

*Вселенная* — это весь мир, безграничный во времени и пространстве. Доступна изучению астрономическими средствами только часть Вселенной. Эта часть обычно называется *Метагалактикой*. Разумеется, по мере развития науки и техники доступные изучению пределы непрерывно расширяются. Исторически совсем недавно, еще в XVII в. астрономия ограничивалась изучением окрестностей только одной звезды — Солнца, т.е. она изучала нашу планетную систему. Диаметр этой системы — около 10 млрд км, свет проходит за 10 ч.

Только в 1930-х гг. удалось установить размеры и основные черты строения нашей Галактики, в которую входит Солнце. Поперечник Галактики приблизительно 30 000 парсек, т.е. около 100 000 световых лет:

$$1 \text{ парсек (пк)} = 3,26 \text{ светового года} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ м.}$$

В Галактику входит более 100 млрд звезд и расположены они не хаотически по всему пространству, а в слое диска толщиной в несколько сотен парсек, следовательно, толщина диска намного меньше его диаметра.

Солнце находится в диске Галактики на расстоянии около 10 000 пк от его центра.

Диск Галактики медленно вращается вокруг своей оси. Время одного оборота около 200 млн лет, так что за время своего существования Галактика совершила всего несколько десятков оборотов вокруг своей оси.

Средний возраст галактик приблизительно 10 млрд лет. В Метагалактике находится не менее 100 млн галактик.

Все галактики Э. Хаббл разбил на три основных типа: эллиптические, спиральные и неправильные.

Эллиптическую форму имеют многие галактики. У самых крупных из них поперечник сравним с диаметром нашей Галактики, но таких гигантских эллиптических галактик сравнительно немного. Чаше встречаются так называемые карликовые эллиптические галактики с размером в поперечнике около 2000 пк, содержащие несколько миллионов звезд.

Спиральные галактики — сильно сплюснутые системы гораздо большей яркости, чем широко распространенные карликовые эллиптические галактики. *К спиральным относится и наша Галактика.*

Примерами неправильных галактик являются Магеллановы Облака, у которых отсутствует центральное ядро и плоскость симметрии вращения. Около четверти всех галактик — неправильные (оценка Э. Хаббла).

Общее число звезд в Метагалактике — более  $10^{20}$ .

Пространственная структура Вселенной отнюдь не представляет собой какую-то застывшую, статичную картину. Вселенная расширяется. В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл показал, что скорость разлета галактик прямо пропорциональна расстоянию от нашей Галактики. Скорости разлета могут достигать огромных величин. Так, *можно указать источник, расположенный на расстоянии 5—6 млрд световых лет, удаляющийся от нас со скоростью около половины скорости света.*

Факт разлета галактик подтверждается знаменитым «красным смещением», происходящим вследствие известного в физике эффекта Доплера. Астрономы наблюдали спектры далеких туманностей и установили, что хорошо известные линии, например, ионизированного кальция или водорода, находятся не на своих местах, а сдвинуты далеко в красную сторону спектра. Возрастание длин волн обусловлено именно удалением источников. Эффект Доплера известен каждому, кто слушал, как меняется тон гудка проходящего поезда при приближении к нам, а затем при удалении от нас.

Отметим интересную особенность: разбегание галактик происходит не только относительно Земли. *Из любой точки Вселенной далекие галактики будут видны удаляющимися от этой точки.* Экстраполяция расширяющейся Вселенной в обратную временную сторону приводит к выводу, что все началось с большого взрыва около 15 млрд лет назад, что и считают возрастом Вселенной, а точнее, возрастом Метагалактики. Здесь такая тонкость: отождествлять возраст Метагалактики и всей Вселенной рано, потому что есть гипотеза о существовании нескольких Метагалактик, расположенных на некоторых расстояниях друг от друга. Хотя эта гипотеза и ничем не подтверждена, но и опровергнуть ее тоже нельзя.

Анализ наблюдаемой картины позволяет сделать вывод, что исходная материя имела, по крайней мере, ядерную плотность порядка  $10^{15}$ — $10^{18}$  г/см<sup>3</sup> и высокую температуру. Более или менее надежно можно описывать поведение вещества, начиная примерно с 0,01 с от момента

взрыва. *Дальнейшая экстраполяция в прошлое требует уточнения физических законов.*

В первые несколько минут развития мира образовались простейшие атомные ядра — водорода, дейтерия, гелия. Через несколько миллионов лет непрерывного расширения вещество остыло до температуры 4000 К, и произошла рекомбинация, т.е. соединение электронов с атомными ядрами и образование, таким образом, первых нейтральных атомов.

Газ продолжал остывать и, двигаясь по инерции с имевшимися случайными скоростями, одни элементы газа стали сталкиваться с другими, образуя комки, масса которых порядка массы скопления галактик. Из этих комков затем оформились и отдельные галактики.

*Теория расширяющейся Вселенной в настоящее время не является единственной.* В 2003 г. профессором физического факультета МГУ Ю. М. Лоскутовым предложен иной подход к задаче об эволюции Вселенной, основанный на анализе не геометрических характеристик, как определяющих, а физических характеристик материи (под которой понимается вещество во всех его формах), заполняющей Вселенную, и на новом, физически обоснованном, уравнении состояния вещества (гипотеза об однородности и изотропности Вселенной была при этом сохранена) (см.: Вестник Московского университета. Серия Физика. Астрономия. 2003. № 6. С. 3). Такой подход приводит к *периодически пульсирующей Вселенной между состояниями с минимальной и максимальной плотностью ее вещества.* Период пульсаций определяется минимальной плотностью вещества.

Если в соответствии с наблюдениями принять, что минимальная плотность вещества во Вселенной близка к значению  $(4—5) \cdot 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>, то полный период эволюции между состояниями с одинаковой, например, максимальной или минимальной плотностью, окажется порядка 30—32 млрд лет. Максимальная плотность вещества достигает значения 10<sup>66</sup> г/см<sup>3</sup>. Современный возраст Вселенной при отсчете времени от состояния с максимальной плотностью составит около 14—15 млрд лет. Получается, что если расширение еще не сменилось сжатием, то до конца расширения осталось по космологическим масштабам не так много времени.

В целом картина эволюции в предложенной модели выглядит следующим образом. В моменты начала и конца процессов расширения и сжатия абсолютная температура во Вселенной оказывается строго равной нулю. Примерно через  $5 \cdot 10^{-30}$  с после начала расширения температура повысится до величины порядка 10<sup>25</sup> К, и плотность излучения намного превысит плотность массивного вещества. Процессы аннигиляции электронов и позитронов завершатся к моменту времени порядка 10<sup>-7</sup> с, температура при этом упадет до примерно 10<sup>10</sup> градусов. Спустя 10 000 лет температура опустится до значения около 20 000 градусов и начнутся процессы рекомбинации (образования) атомов водорода. В принципе, пользуясь всем арсеналом физики, можно оценить процентное содержание во Вселенной образующихся водорода, гелия,



углерода и пр. на текущий момент (об этом можно прочесть, например, в книге С. Вайнберга «Гравитация и космология». М., 1975). Как ни удивительно, но получаемые теоретические оценки вполне удовлетворительно согласуются с наблюдениями.

## 2.2. Звезды. Солнце

Основную часть всех галактик составляют звезды. В звездах сосредоточено более 90% видимого вещества Вселенной.

*Звезды — это массивные самосветящиеся газовые образования. Вещество связано в них силой гравитации.*

Массы звезд могут различаться в несколько тысяч раз. Масса нашей ближайшей звезды — Солнца равна  $M_c = 2 \cdot 10^{33}$  г. Самые массивные звезды имеют массу около  $100 M_c$ , самые мелкие — примерно  $0,03 M_c$ .

Еще меньше различаются звезды по температуре поверхности. Самые горячие имеют температуру 100 000 К, Солнце — около 6000 К, самые холодные — приблизительно 1000 К. Большинство звезд имеют температуру от 3000 до 50 000 К.

Самым существенным образом звезды различаются по светимости: здесь различия могут достигать 12 порядков.

Основной источник энергии большинства звезд — термоядерные реакции синтеза элементов. Массивные звезды сжигают свое ядерное топливо за миллионы лет, Солнцу для этого нужно 10 млрд лет (из них 5 млрд лет уже прошло), а у более легких звезд время сгорания еще больше, причем оно может превосходить возраст структур Вселенной, равный примерно 15 млрд лет. Подробнее о термоядерных реакциях синтеза будет сказано ниже, а пока остановимся на строении Солнца.

С астрономической точки зрения Солнце ничем не выделяется среди остальных звезд Галактики — это самосветящийся газовый шар, находящийся в равновесии под действием сил гравитации и газового давления. Роль других сил, в том числе и магнитных, в поддержании механического равновесия Солнца мала. Но магнитные поля играют доминирующую роль в создании всевозможных образований в его атмосфере.

Наружные слои Солнца, из которых выходит принимаемое нами оптическое излучение, называется *фотосферой*. Слой этот достаточно тонкий, его толщина примерно 500 км. Температура газа в фотосфере 6000 К. Фотосфера образует нижнюю часть атмосферы. Над ней расположена *хромосфера* толщиной несколько тысяч километров с постепенным повышением температуры до 10 000 К и более. Выше хромосферы находится *корона* — очень протяженная внешняя часть атмосферы, нагретая, в среднем, до 1—2 млн градусов и плавно переходящая в межпланетную среду.

Непосредственно под фотосферой расположена конвективная зона Солнца, в которой энергия из недр наружу передается в основном при

механическом перемешивании вещества — всплывании горячих газовых струй и движении вниз остывшего газа. В недрах Солнца, где протекают термоядерные реакции синтеза, температура превышает 10 млн К. Энергия из недр в верхние слои передается, в основном, излучением.

*Солнце вращается вокруг оси, но совсем не так, как обычное твердое тело, а дифференциально.* Это означает, что различные части вращаются с разными скоростями. Период вращения изменяется от 27 суток на экваторе до 32 суток у полюсов. Кроме того, есть основания считать, что более глубокие слои вращаются быстрее внешних. Экватор Солнца наклонен к плоскости орбиты Земли на  $7^{\circ}15'$ .

### 2.3. Фундаментальные взаимодействия в природе

При всей огромности и многообразии окружающего нас мира существует всего четыре вида фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами, из которых все и состоит.

1. **Сильное взаимодействие.** Это действительно самое сильное из четырех видов взаимодействия, но радиус его действия очень мал и ограничивается размерами атомного ядра:  $r \sim 10^{-13}$  см. Сильное взаимодействие обеспечивает связь протонов и нейтронов (называемых еще нуклонами) в ядрах атомов.

2. **Электромагнитное взаимодействие.** Радиус действия неограничен, или, как говорят, радиус действия стремится к бесконечности:  $r \rightarrow \infty$ . Если сильное взаимодействие принять за единицу, то электромагнитное слабее примерно в 1000 раз.

3. **Слабое взаимодействие.** Такое же короткодействующее взаимодействие, как и сильное, но составляет от него примерно  $10^{-15}$  и отвечает за все виды  $\beta$ -распада ядер и за все процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Насколько слабо нейтрино взаимодействует характеризует, например, такой факт, что нейтрино спокойно может «прошить» весь земной шар без единого взаимодействия с чем-либо.

4. **Гравитационное взаимодействие.** Радиус действия неограничен. Очень слабое взаимодействие, составляющее примерно  $10^{-40}$  от сильного. Поэтому в процессах микромира заметной роли не играет, но является самым универсальным.

Если пока оставить в стороне процессы микромира, то в макроскопических масштабах мы имеем дело только с двумя видами фундаментальных взаимодействий — электромагнитным и гравитационным.

Обратим внимание на одну тонкость: мы говорим о взаимодействиях, но не о силах. Есть важное различие. Понятие силы применимо не всегда, а понятие взаимодействия — всегда. В микромире, где действуют законы квантовой механики, применение понятия силы затруднено, потому что сила является вектором и необходимо указывать его точку приложения, а это как раз и невозможно сделать однозначно из-за действия принципа неопределенности Гейзенберга (разговор о кото-

ром впереди). По этой же причине в микромире обычно не используется и понятие траектории движения: элементарная частица, например, электрон в атоме движется, а по какой траектории — неизвестно.

То, что упомянутые четыре взаимодействия являются фундаментальными, означает, что все другие взаимодействия и силы сводятся именно к ним. Например, всем известны силы упругости и силы трения. Оба типа таких сил обусловлены характером взаимодействия между молекулами вещества, а *межмолекулярные силы имеют электромагнитное происхождение* вследствие довольно сложного пространственного распределения положительных и отрицательных зарядов в каждом атоме или молекуле. Следовательно, упругие силы и силы трения являются по своей природе электромагнитными.

## 2.4. Границы применимости классической физики

Изучение наиболее общих законов природы — законов физики — проще всего начать с классической механики. Классическую механику часто называют ньютоновской механикой из-за решающего вклада Ньютона, который еще в 1687 г. сформулировал три основных закона в знаменитом труде «Математические начала натуральной философии».

Постепенно с развитием физики стали появляться факты, которые классическая механика объяснить не могла. Для этого потребовалось создать специальную теорию относительности (А. Эйнштейн, 1905 г.). Но что важно, это не привело к отрицанию ньютоновской механики, просто были четко определены ее границы: классическая механика является частным случаем релятивистской механики, когда скорости тел малы по сравнению со скоростью света.

Классическая механика является частным случаем и квантовой механики, созданной для микромира в 1920-х гг. Из уравнений квантовой механики можно получить уравнения классической механики, если перейти к большим массам по сравнению с массами атомов.

*Коротко говоря, классическая механика применима для относительно больших масс, движущихся с малыми скоростями.*

## 2.5. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета

Все законы Ньютона возникли в результате обобщения множества опытных фактов. Правильность законов подтверждается согласием с опытом тех следствий, которые из этих законов вытекают.

Первый закон Ньютона формулируется следующим образом: *всякая материальная точка находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние. Материальной точкой называется тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других тел.*

Заметим, что иногда (и довольно часто) в учебной литературе формулировка первого закона приводится для тела, а не для материальной точки, что неверно, потому что для тела первый закон Ньютона, вообще говоря, неприменим. Действительно, можно привести пример тела, на которое не действуют никакие силы (допустим, в отдаленной точке космоса), а оно не движется равномерно и прямолинейно, вращаясь вокруг собственной оси (будучи когда-то раскрученным).

В обоих названных в формулировке первого закона состояниях ускорение равно нулю, поэтому можно сказать так: *скорость материальной точки остается постоянной (в частности, равной нулю), пока воздействию на нее со стороны других тел не вызовет ее изменения.*

Способность тел сохранять свою скорость при отсутствии воздействия называется *инерцией тел*, а сам закон часто называют *законом инерции*.

Система отсчета, в которой выполняется первый закон Ньютона, называется *инерциальной*. Система отсчета, связанная с Землей, инерциальной не является из-за вращения Земли как вокруг собственной оси, так и вокруг Солнца.

С достаточной для большинства задач точностью можно считать инерциальной гелиоцентрическую систему отсчета. Начало отсчета в этой системе совпадает с центром масс Солнца, а три оси направлены на удаленные и относительно неподвижные звезды.

Любая система отсчета, движущаяся относительно инерциальной равномерно и прямолинейно тоже является инерциальной. Следовательно, существует бесконечное множество инерциальных систем.

## 2.6. Второй закон Ньютона

Импульсом тела называется произведение его массы на скорость:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}. \quad (2.1)$$

Это выражение подходит для определения импульса и материальных точек и протяженных тел, движущихся поступательно (при таком движении скорость всех точек тела одинакова).

Согласно второму закону Ньютона *скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе:*

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{F}. \quad (2.2)$$

Поскольку производная по времени в физике встречается очень часто, то для нее принято специальное обозначение — точка сверху, что мы и использовали в выражении (2.2). Вторая производная по времени будет обозначаться двумя точками сверху и т.д.

В рамках классической механики можно учесть, что  $m = \text{const}$  и получить более простое соотношение:

$$\frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt} = ma = \mathbf{F}. \quad (2.3)$$

Однако предыдущее соотношение (2.2) более универсально, его можно использовать и в релятивистской механике, подставляя релятивистское выражение для импульса материальной точки.

Напомним, что одно векторное уравнение, например (2.3), эквивалентно трем скалярным уравнениям

$$m\ddot{x} = F_x, \quad m\ddot{y} = F_y, \quad m\ddot{z} = F_z. \quad (2.4)$$

Особо отметим частный случай второго закона, когда  $\mathbf{F} = 0$ , т.е. когда отсутствует воздействие со стороны других тел. При этом получаем, что ускорение  $\mathbf{a} = 0$ , следовательно, имеем утверждение первого закона Ньютона. Значит, первый закон входит во второй как его частный случай. Тем не менее первый закон формулируется независимо от второго ввиду важности понятия инерциальных систем отсчета. Соотношение (2.2) называют уравнением движения материальной точки (соответственно, и (2.3)).

## 2.7. Третий закон Ньютона

Всякое действие тел друг на друга является взаимодействием, т.е. силы всегда возникают попарно. Согласно третьему закону Ньютона *силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по величине, противоположны по направлению и приложены к разным телам:*

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}, \quad (2.5)$$

где  $\mathbf{F}_{12}$  — сила, действующая на первое тело со стороны второго;  $\mathbf{F}_{21}$  — сила, действующая на второе тело со стороны первого.

В неинерциальных системах отсчета третий закон Ньютона, как и первые два, оказывается несправедливым.

Вполне строго третий закон выполняется при контактных взаимодействиях тел, которые можно считать материальными точками, а также и для покоящихся на расстоянии друг от друга тел.

Отметим, что силы  $\mathbf{F}_{12}$  и  $\mathbf{F}_{21}$  уравновесить друг друга не могут, потому что они приложены к разным телам.

## 2.8. Закон всемирного тяготения

Данный закон, количественно описывающий самое универсальное гравитационное взаимодействие, установил также Ньютон в 1678 г.



Справедливости ради его следовало бы назвать четвертым законом Ньютона.

Формулировка закона всемирного тяготения: *две материальные точки притягивают друг друга с силой, пропорциональной массам этих точек и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними,*

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.6)$$

где коэффициент пропорциональности  $G$  называется гравитационной постоянной.

В таком виде закон справедлив не только для материальных точек, но и для однородных шаров. В этом случае под  $r$  подразумевается расстояние между центрами шаров. Силы взаимного притяжения направлены вдоль прямой, соединяющей материальные точки.

Смысл гравитационной постоянной прост:  $G$  численно равна силе взаимодействия между шарами с массой по 1 кг, расположенными на расстоянии 1 м между их центрами.  $G$  впервые определена экспериментально Г. Кавендишем в 1798 г. с помощью крутильных весов. Современное значение  $G$ :

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

## 2.9. Закон сохранения механической энергии

Система тел, в которой внешние силы отсутствуют, называется *замкнутой*, или *изолированной*. В такой системе действуют только внутренние силы, обусловленные взаимодействием тел, входящих в систему.

Замкнутые системы обладают очень важным свойством: в них сохраняются три физические величины: энергия, импульс и момент импульса. Следовательно, существуют три закона сохранения, которые являются фундаментальными законами природы. Эти законы обусловлены свойствами пространства и времени и имеют всеобщий характер, потому что они применимы не только к механическим явлениям, но и ко всем явлениям природы. Законы сохранения не зависят от природы и характера действующих сил.

Среди всех сил особо выделяются так называемые консервативные силы.

*Консервативными* называются силы, работа которых по замкнутому контуру равна нулю, т.е. не зависит от траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения частицы.

Пример консервативных сил: силы всемирного тяготения, электростатические силы, описываемые законом Кулона. К неконсервативным силам относятся силы трения. Работа сил трения зависит от траектории движения. Чем длиннее путь, проходимый по траектории, тем больше работа сил трения. И работа по замкнутому контуру не равна нулю.

Полной механической энергией  $E$  системы материальных точек называется сумма ее кинетической и потенциальной энергии:

$$E = T + U.$$

Потенциальная энергия взаимодействия частиц системы зависит только от их взаимного расположения, т.е. от конфигурации системы. Всем известна потенциальная энергия тела, поднятого на высоту  $h$  от поверхности Земли:  $U = mgh$ , а также сжатой на величину  $x$  пружины:  $U = kx^2 / 2$ . В случае пружины потенциальная энергия зависит от взаимного положения отдельных частей тела. Потенциальную энергию несжатой пружины мы взяли равной нулю. Чтобы пружина приобрела потенциальную энергию, необходимо над ней совершить работу, в точности равную величине приобретенной потенциальной энергии.

В поле сил тяжести полная механическая энергия равна:

$$E = \frac{mv^2}{2} + mgh.$$

Кинетическая и потенциальная энергии могут превращаться друг в друга (пример прыгающего мячика).

Закон сохранения механической энергии гласит: *полная механическая энергия замкнутой системы материальных точек, между которыми действуют только консервативные силы, остается постоянной.*

Если же в системе есть и неконсервативные силы, то полная механическая энергия не сохраняется. При наличии, например, трения полная механическая энергия будет уменьшаться, постепенно переходя во внутреннюю энергию тел, что приводит к их нагреванию.

Закон сохранения энергии обусловлен однородностью времени. Это означает, что замена момента времени  $t_1$  моментом времени  $t_2$  без изменения значений координат и скоростей тел не изменяет механических свойств системы.

## 2.10. Закон сохранения импульса

Сумма импульсов частиц, образующих систему, называется импульсом системы  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_i = \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i.$$

Полный импульс замкнутой системы не меняется с течением времени ни по величине, ни по направлению:

$$\mathbf{P} = \sum_i \mathbf{P}_i = \text{const.} \quad (2.7)$$

Данный закон сохранения импульса обусловлен однородностью пространства, т.е. одинаковостью свойств пространства во всех точках. Параллельный перенос замкнутой системы из одного места в другое без изменения конфигурации и скоростей частиц не изменяет механических свойств системы.

Что же может изменить импульс системы? Только внешние силы, потому что сумма внутренних сил, действующих на тела системы, всегда равна нулю из-за действия третьего закона Ньютона, потому что внутренние силы всегда возникают попарно:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i.$$

Читается формула так: производная по времени от суммарного импульса системы равна сумме внешних сил, действующих на тела системы.

Важно отметить, что применимость закона сохранения импульса не ограничивается только замкнутыми системами:

1) импульс остается постоянным и для незамкнутой системы, если внешние силы в сумме дают все время нуль;

2) например, если тела движутся по гладкой горизонтальной поверхности, то силы тяжести и силы реакции со стороны поверхности, действующие на эти тела и являющиеся внешними, все время равны и противоположны;

3) если сумма проекций внешних сил на какое-либо направление (например, на ось  $X$ ) равна нулю в любой момент времени, то проекция импульса на это направление остается постоянной, хотя проекции импульса на другие направления могут при этом изменяться;

4) при кратковременном воздействии внешних сил изменение импульса системы может оказаться столь малым, что им можно пренебречь по сравнению с уже имеющимся у системы импульсом. В этом случае могут сохраняться все три проекции импульса системы, как и для замкнутой системы.

## 2.11. Закон сохранения момента импульса

Сначала дадим определения ряду необходимых понятий.

*Моментом силы* относительно точки  $O$  называется векторное произведение радиус-вектора из этой точки в точку приложения силы и вектора силы:

$$\mathbf{N} = [\mathbf{r}\mathbf{F}]. \quad (2.8)$$

Радиус-вектором называется вектор, проведенный из начала координат в данную точку. Величина вектора  $\mathbf{N}$  определяется, как и для любого векторного произведения, выражением

$$|\mathbf{N}| = |\mathbf{r}||\mathbf{F}|\sin\alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{F}$ .

Направление вектора  $\mathbf{N}$  определяется также в соответствии с определением векторного произведения, т.е. по правилу правого буравчика: расположив рукоятку буравчика вдоль направления первого вектора в произведении (в данном случае вдоль  $\mathbf{r}$ ), вращаем ее по кратчайшему направлению до совмещения с направлением второго вектора ( $\mathbf{F}$ ). Куда при этом будет поступательно двигаться правый буравчик, туда и направляем вектор  $\mathbf{N}$ . Пусть, например, на рис. 13 векторы  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{F}$  лежат в плоскости листа. Тогда вектор  $\mathbf{N}$  перпендикулярен к поверхности листа и направлен за него, т.е. входит в лист, что отмечено знаком  $\otimes$ . Длина  $l$  перпендикуляра из точки на прямую вдоль действия силы называется плечом силы относительно точки:  $l = r \sin\alpha$ .

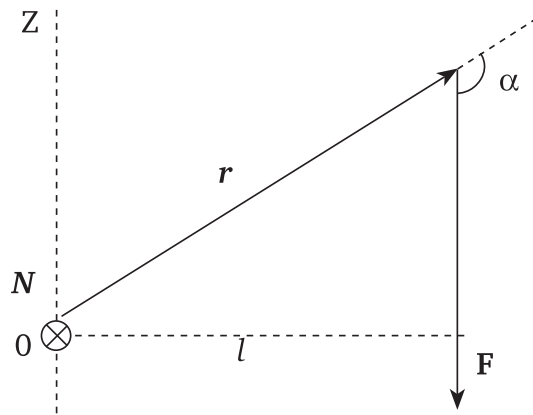


Рис. 13

Проекция вектора  $\mathbf{N}$  на некоторую ось  $Z$ , проходящую через точку  $O$ , относительно которой определен  $\mathbf{N}$ , называется моментом силы относительно этой оси:

$$N_z = [\mathbf{rF}]_{\text{пр.}z}.$$

На рис. 13  $N_z = 0$ , так как вектор  $\mathbf{N}$  направлен перпендикулярно к оси  $Z$ . Аналогично определяется и момент импульса.

Для одной материальной точки моментом импульса относительно точки  $O$  называется вектор

$$\mathbf{L} = [\mathbf{rp}] = [\mathbf{r}, m\mathbf{v}]. \quad (2.9)$$

Моментом импульса материальной точки относительно оси называется проекция вектора  $\mathbf{L}$  на эту ось:

$$L_z = [\mathbf{rp}]_{\text{пр.}z}.$$

Моментом импульса системы материальных точек относительно какой-либо точки (или оси) называется сумма моментов импульсов относительно этой точки (или оси) всех материальных точек системы:

$$\mathbf{L} = \sum \mathbf{L}_i.$$

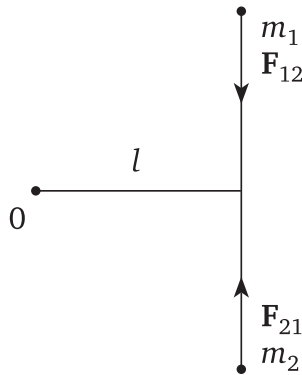


Рис. 14

Можно показать, что момент импульса системы могут изменить только моменты внешних сил. Действительно, рассмотрим две точки системы на рис. 14. Внутренние силы между ними действуют вдоль одной прямой, поэтому их моменты относительно произвольной точки  $O$  равны по величине и противоположны по направлению. Следовательно, моменты внутренних сил попарно уравниваются друг друга и сумма моментов всех внутренних сил для любой системы частиц (в частности, и для твердого тела) всегда равна нулю. Можно записать:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \sum \mathbf{N}_{\text{внеш}}. \quad (2.10)$$

Производная по времени момента импульса системы относительно какой-либо точки (или оси) равна сумме моментов относительно той же точки (или оси) всех внешних сил, действующих на точки системы.

Выражение (2.10) и приведенную формулировку часто называют законом изменения момента импульса или уравнением моментов.

Если система замкнута, то  $d\mathbf{L}/dt = 0$  и

$$\mathbf{L} = \text{const}. \quad (2.11)$$

*Момент импульса замкнутой системы не изменяется с течением времени. Это и есть закон сохранения момента импульса.*

Важно отметить, что величина момента импульса системы относительно разных точек (или осей) может быть различной. Но если мы выбрали любую произвольную точку и относительно нее подсчитали момент импульса системы, то эта величина для замкнутой системы со временем меняться не будет. В качестве примера действия закона сохранения момента импульса можно привести изменение скорости вращения фигуриста при сведении или разведении рук.

*Закон сохранения момента импульса обусловлен изотропией пространства, что означает одинаковость свойств пространства по всем*



направлениям. Поворот замкнутой системы частиц без изменения их взаимного расположения и относительных скоростей не изменяет механических свойств системы.

## 2.12. Движение центра масс

У любой системы материальных точек (в частности, и у твердого тела) существует одна точка, которая движется особым образом. Эта точка — центр масс (или центр инерции).

Центром масс (или центром инерции) системы называется точка, положение которой задается радиус-вектором:

$$\mathbf{R}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i. \quad (2.12)$$

Здесь  $m$  — суммарная масса системы:  $m = \sum_i m_i$ ;  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы;  $\mathbf{r}_i$  — радиус-вектор, задающий положение  $i$ -й частицы.

Декартовы координаты центра масс получаются проектированием вектора  $\mathbf{R}_c$  на координатные оси:

$$x_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i x_i, \quad y_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i y_i, \quad z_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i z_i.$$

Заметим, что центр масс не обязательно совпадает с положением какой-либо материальной точки системы. Например, в случае системы из двух материальных точек центр масс никогда не совпадает ни с одной из них (разумеется, если расстояние между точками всегда больше нуля).

Производная по времени  $\mathbf{R}_c$  дает нам скорость центра масс:

$$\mathbf{V}_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i = \frac{1}{m} \sum_i \mathbf{P}_i = \frac{\mathbf{P}}{m},$$

где  $\mathbf{P}$  — импульс системы.

Отсюда получаем:

$$\mathbf{P} = m\mathbf{V}_c.$$

Подставив это в выражение (2.12), получим уравнение движения центра масс:

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{V}_c) = m\dot{\mathbf{V}}_c = m\mathbf{a}_c = \sum_i \mathbf{F}_i, \quad (2.13)$$

где  $\mathbf{a}_c$  — ускорение центра масс.

Итак, мы получили, что *центр масс движется так, как двигалась бы материальная точка с массой, равной массе системы, под действием результирующей всех внешних сил, приложенных к точкам системы.*

Коротко говоря, закон движения центра масс совпадает с законом движения материальной точки массы  $m$  (всей системы), к которой приложены все *внешние* силы.

Отметим, что во второй закон Ньютона для одной материальной точки  $m\mathbf{a} = \sum \mathbf{F}_i$  в сумму сил входят все силы, как внутренние, так и внешние.

Для замкнутой системы  $a_c = 0$ . Это означает, что центр масс замкнутой системы или покоится, или движется равномерно и прямолинейно. Внутренние силы ничего не могут с ним сделать.

## 2.13. Принцип относительности Галилея

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета, одна из которых покоится, а другая движется по отношению к ней с постоянной скоростью  $V_0$ , направленной вдоль оси  $X$  (рис. 15). Неподвижную систему обозначим  $K$ , подвижную  $K'$  (штриховая система). Найдем связь между координатами  $x, y, z$  некоторой точки  $P$  в системе  $K$  и координатами  $x', y', z'$  той же точки в системе  $K'$ . Начало отсчета времени выберем такое, когда начала координат обеих систем совпадают.

Тогда

$$\begin{aligned}x &= x' + V_0 t', \\y &= y', \\z &= z', \\t &= t'.\end{aligned}\tag{2.14}$$

Совокупность четырех уравнений (2.14) называется *преобразованиями Галилея*. Первое и четвертое уравнения справедливы только для классической механики, т.е. при  $V_0 \ll c$ . При  $V_0$ , сравнимых со скоростью света, преобразования Галилея должны быть заменены на более общие преобразования Лоренца.

Найдем связь между скоростями точки  $P$  в обеих системах отсчета. Для этого продифференцируем координатные соотношения (2.14) по времени:

$$\begin{aligned}x &= x' + V_0 t, & V_X &= V'_X + V_0, \\y &= y', & \text{или } V_Y &= V'_Y, \\z &= z', & V_Z &= V'_Z.\end{aligned}$$

Эти три скалярных соотношения эквивалентны одному векторному:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}' = \mathbf{V}_0.\tag{2.15}$$

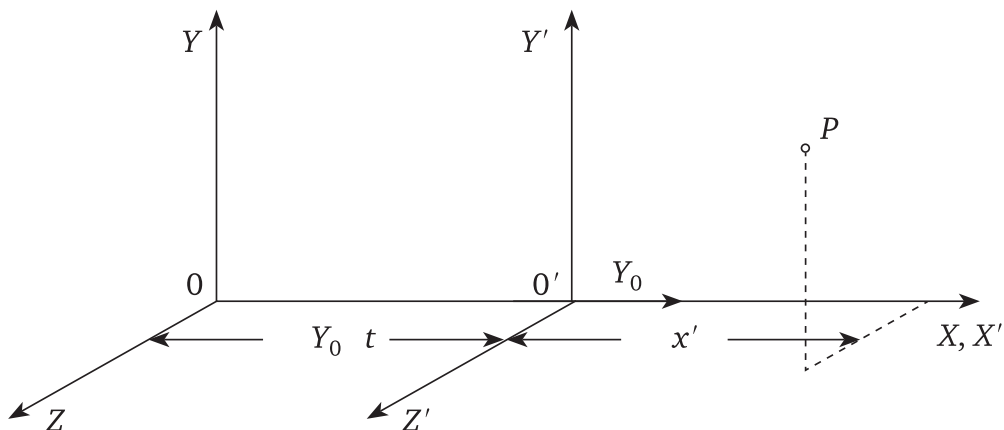


Рис. 15

Выражение (2.15) является правилом сложения скоростей в классической механике. Заметим, что данное соотношение остается справедливым и при любом другом выборе взаимных направлений координатных осей систем  $K$  и  $K'$ .

Продифференцируем по времени выражение (2.15), учтя при этом, что  $V_0 = \text{const}$ :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}' \text{ или } \mathbf{a} = \mathbf{a}'.$$

Это означает, что ускорение тела во всех инерциальных системах отсчета оказывается одинаковым. Поскольку масса в классической механике постоянна, то умножив обе части последнего уравнения на  $m$ , получим:

$$m\mathbf{a} = m\mathbf{a}' \text{ или } \mathbf{F} = \mathbf{F}'. \quad (2.16)$$

Полученный результат для произвольно выбранных систем  $K$  и  $K'$  означает, что уравнения механики не изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, или, как иногда говорят, инвариантны по отношению к преобразованиям Галилея. Данное утверждение называется принципом относительности Галилея. По-другому можно сказать и так: все механические явления в различных инерциальных системах отсчета протекают одинаково, вследствие чего никакими механическими опытами невозможно установить, покоится данная система отсчета или движется прямолинейно и равномерно.

## 2.14. Механика твердого тела

Под твердым телом будем подразумевать абсолютно твердое тело, в котором расстояния между любыми двумя точками неизменны. Это типичная физическая абстракция и обоснована она тем, что во многих случаях деформациями тел при изучении их движения можно пренебречь.

Твердое тело можно представить как совокупность большого количества очень малых масс  $\Delta m_i$ , которые можно считать материальными точками. Каждая из этих элементарных масс может находиться под воздействием как внутренних сил, обусловленных взаимодействием с другими материальными точками тела, так и внешних сил. Поэтому к телу можно применять соответствующие результаты, полученные для систем материальных точек. Вот как, например, можно сформулировать теорему о движении центра масс твердого тела: *центр масс твердого тела движется так, как двигалась бы материальная точка с массой, равной массе тела, и к которой приложены все внешние силы, действующие на тело.*

Вращение тела вокруг оси характеризуется угловой скоростью и угловым ускорением. Величина угловой скорости  $\omega$  определяется как производная от угла поворота  $\varphi$  по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}.$$

Направляем вектор  $\omega$  вдоль оси вращения так, чтобы направление вращения и направление  $\omega$  образовывали правовинтовую систему, как показано на рис. 16.

Изменение угловой скорости со временем определяется вектором углового ускорения  $\beta$ :

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \dot{\omega}.$$

Связь векторов угловой и линейной скорости дается выражением

$$\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega} \mathbf{r}].$$

Здесь радиус-вектор  $\mathbf{r}$  может быть проведен из любой точки  $O$ , лежащей на оси вращения. Все три вектора из последнего выражения показаны на рис. 16.

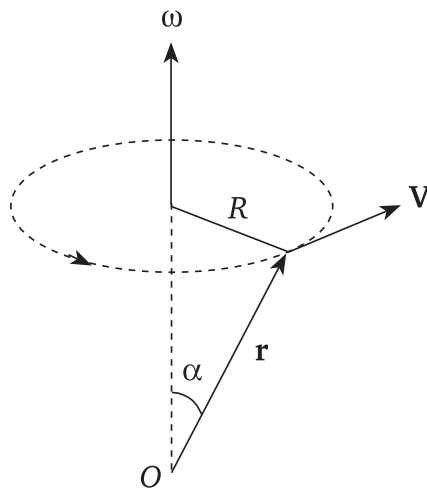


Рис. 16

Найдем момент импульса материальной точки, двигающейся по окружности. По определению  $\mathbf{L} = [\mathbf{r}, m\mathbf{v}]$ . Величина вектора  $\mathbf{L}$ :

$$|\mathbf{L}| = mRv = mR \cdot \omega R = mR^2\omega.$$

Здесь было учтено, что  $R = r \sin \alpha$ . По направлению  $\mathbf{L}$  совпадает с направлением  $\omega$ . Итак,  $\mathbf{L} = mR^2\omega = I\omega$ .

Величина  $I = mR^2$  называется *моментом инерции материальной точки*.

Производная по времени равна

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} = I\beta.$$

В соответствии с законом изменения момента импульса (2.10) получаем:

$$I\beta = \sum \mathbf{N}_{\text{внеш}}. \quad (2.17)$$

Выражение (2.17) называется уравнением моментов для материальной точки, или основным законом динамики для вращения материальной точки вокруг неподвижной оси. Действительно, это выражение внешне очень похоже на выражение второго закона Ньютона

$$m\mathbf{a} = \sum \mathbf{F}_i.$$

Аналогом массы  $m$  в (2.17) является момент инерции  $I$ , аналогом линейного ускорения  $\mathbf{a}$  — угловое ускорение  $\beta$  и аналогом силы  $\mathbf{F}$  — момент силы  $\mathbf{N}$ . Эти и другие подобные аналогии в динамике твердого тела оказываются полезными.

Рассмотрим, как будет двигаться тело вокруг неподвижной оси под действием внешних сил. Поскольку твердое тело можно представить как систему материальных точек, удерживаемых внутренними силами на неизменных расстояниях друг от друга, то для него, как и для любой системы материальных точек, справедлив закон изменения момента импульса системы:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \sum \mathbf{N}_{\text{внеш}}. \quad (2.18)$$

Момент импульса  $i$ -ой частицы  $L_i = \Delta m_i r_i^2 \omega$ , где  $r_i$  — радиус окружности, по которой движется материальная точка  $\Delta m_i$  относительно оси вращения тела. Направление всех  $\mathbf{L}$  одинаковое, потому что в каждый момент времени угловые скорости всех точек тела  $\omega$  одинаковы:

$$\mathbf{L} = \sum \mathbf{L}_i = \omega \sum \Delta m_i r_i^2 = I\omega.$$



Величина

$$I = \sum \Delta m_i r_i^2 \quad (2.19)$$

называется *моментом инерции твердого тела* относительно данной оси. Сравнив выражение  $\mathbf{L} = I\omega$  с выражением для импульса  $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$ , заметим, что при вращательном движении аналогом импульса является момент импульса  $\mathbf{L}$ .

Отмеченные выше аналогии поступательного и вращательного движений имеют общий характер, и ими можно пользоваться для получения ряда формул вращательного движения. Так, заменив в выражении для кинетической энергии  $T = \frac{mv^2}{2}$  массу на момент инерции  $I$ , а ско-

рость  $v$  — на угловую скорость  $\omega$ , получим кинетическую энергию вращающегося вокруг неподвижной оси тела:

$$T = \frac{1}{2} I \omega^2.$$

Подставим момент импульса тела  $\mathbf{L} = I\omega$  в выражение (2.18):

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = I\beta = \sum \mathbf{N}_{\text{внеш}}. \quad (2.20)$$

Данное соотношение называют *законом изменения момента импульса твердого тела* или *основным законом динамики* (вторым законом Ньютона) для вращения твердого тела вокруг неподвижной оси. Коротко выражение (2.20) называют еще *уравнением моментов*.

## 2.15. Момент инерции твердого тела

Для определения момента инерции твердого тела относительно произвольной оси необходимо, прежде всего, найти момент инерции этого тела относительно оси, проходящей через центр масс тела. Найдем, например, момент инерции полого цилиндра относительно его оси симметрии  $OO$ . В соответствии с определением (2.19)

$$I = \sum \Delta m_i r_i^2 = R^2 \sum \Delta m_i = mR^2,$$

где  $m$  — масса цилиндра.

Итак, момент инерции полого цилиндра не зависит от высоты этого цилиндра. Точно так же выглядит и выражение для момента инерции обруча.

Для полного определения момента инерции более сложных тел выражение (2.19) следует уточнить, устремив элемент  $\Delta m_i$  к нулю и найдя соответствующий предел:

$$I = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \sum r_i^2 \Delta m_i.$$

Как известно, такой предел называется интегралом:

$$I = \int r^2 dm. \quad (2.21)$$

Интегрирование производится по всему телу. Вычисление интеграла (2.21) для произвольных тел весьма непросто, но для симметричных и однородных тел это нетрудно сделать. Приведем результаты вычислений для двух известных тел.

Момент инерции сплошного цилиндра относительно оси симметрии  $OO$  (рис. 17):

$$I = \frac{1}{2} mR^2.$$

Момент инерции однородного шара относительно оси, проходящей через его центр:

$$I = \frac{2}{5} mR^2.$$

Зная момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс, момент инерции относительно произвольной оси вычисляют по *теореме Штейнера*: момент инерции относительно произвольной оси  $I$  равен сумме момента инерции  $I_c$  относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс тела, и произведения массы тела на квадрат расстояния между осями  $d$ :

$$I = I_c + md^2. \quad (2.22)$$

Рисунок 18 иллюстрирует теорему Штейнера для шара. Иногда теорему Штейнера называют теоремой о параллельных осях.

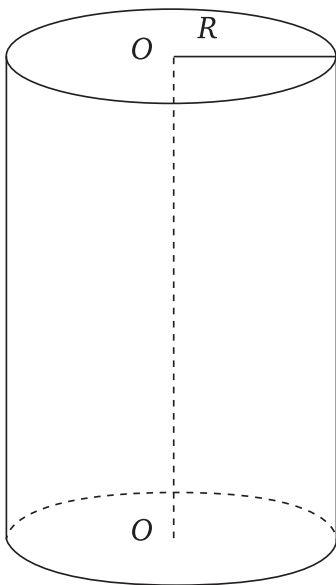


Рис. 17

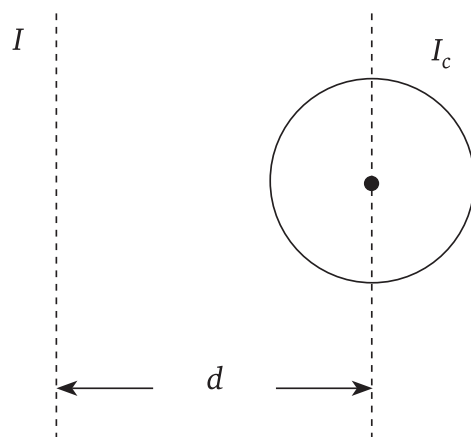


Рис. 18

## 2.16. Колебания и волны

*Колебаниями* называются процессы, при которых какая-либо физическая величина многократно принимает через равные последовательные промежутки времени одни и те же значения (или приблизительно одни и те же).

Если система каким-либо образом выведена из равновесия и затем предоставлена самой себе, то в ней происходят колебания, которые называются *свободными*, или *собственными*. Например, колебания моста, выведенного из равновесия однократным ударом. Если же система колеблется под воздействием периодически изменяющейся внешней силы, то такие колебания называются *вынужденными*. Например, тот же мост под воздействием периодически повторяющейся внешней силы.

Самыми простыми и в то же время наиболее важными являются гармонические колебания, потому что во многих случаях разнообразные периодические процессы могут быть представлены как суперпозиция гармонических колебаний.

*Гармоническими* называются колебания, происходящие по синусоидальному закону, т.е. когда изменение физической величины  $x(t)$  выражается формулой

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \text{ или } x(t) = A \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $\omega$  — круговая или циклическая частота,

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

Частота  $\nu$  — число колебаний в единицу времени;  $T$  — период колебаний, т.е. время, через которое значения колеблющейся величины начинают повторяться:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Величина  $(\omega t + \varphi)$  называется фазой колебаний,  $\varphi$  — начальная фаза колебаний, т.е. фаза при  $t = 0$ . Фаза характеризует отклонение величины  $x$  от нулевого значения в данный момент времени.

Скорость и ускорение при гармоническом колебательном движении точки определяются соответствующими производными по времени:

$$v_x = \dot{x} = \omega A \cos(\omega t + \varphi).$$

$$ax = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x.$$

Полученное соотношение  $\ddot{x} = \omega^2 x = 0$  является дифференциальным уравнением гармонических колебаний. Уравнением такого типа описываются любые гармонические колебания. Например, тело массы  $m$ , колеблющееся под действием силы упругости пружины  $F = -kx$  ( $k$  — коэффициент упругости пружины,  $x$  — смещение тела относительно положения равновесия, знак «минус» означает, что сила направлена в сторону, противоположную смещению  $x$ ), согласно второму закону Ньютона описывается уравнением

$$ma = -kx \text{ или } m\ddot{x} = -kx;$$

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0.$$

Обозначая  $\frac{k}{m} = \omega_0^2$  имеем  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ .

Частота  $\omega_0$  называется *собственной* частотой данного, как говорят, гармонического осциллятора. В других случаях гармонических колебаний выражение для собственной частоты  $\omega_0$  будет зависеть, разумеется, от других величин.

Если в упругой среде (твердой, жидкой или газообразной) где-то возбудить колебания ее частиц, то из-за взаимодействия между частицами колебание начнет распространяться в среде. Процесс распространения колебаний в пространстве называется *волной*. Частицы среды, в которой распространяется волна, не переносятся волной, они лишь совершают колебания около своих положений равновесия.

*Продольной волной* называется волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны. В *поперечной волне* частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространению волны.

Механические поперечные волны могут возникнуть лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвигу. Поэтому в жидкостях и газах могут быть только продольные волны. (Но на *поверхности* жидкости может быть и поперечная волна.) В твердых телах возможны и продольные, и поперечные волны.

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны  $\lambda$ . *Длина волны* — это расстояние, на которое распространяется волна за период

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$$

Скорость волны

$$v = \lambda \nu.$$

## 2.17. Звуковые волны

*Звуковыми волнами*, или просто *звуком* называются упругие волны в любой среде с частотой от 16 Гц до 20 кГц. Волны с частотой меньше 16 Гц называются *инфразвуком*, выше 20 кГц — *ультразвуком*.

Хотя инфразвуки человек и не слышит, но воспринимать их вполне может, потому что некоторые частоты могут оказаться близкими к собственным частотам колебаний некоторых человеческих органов («слышит» не ухом, а телом). При достаточно большой мощности таких инфразвуков последствия могут оказаться крайне нежелательными.

Всякий реальный звук представляет собой не простое гармоническое колебание, а является наложением гармонических колебаний с определенным набором частот. Это утверждение основано на теореме Фурье: *произвольный, периодический во времени физический процесс с частотой  $\omega$ , описываемый функцией  $\varphi(t)$ , может быть представлен в виде суперпозиции бесконечного числа гармонических колебаний, частоты которых образуют дискретную последовательность:*

$$\varphi(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t - \alpha_n). \quad (2.23)$$

Наименьшая частота этого ряда Фурье равна частоте периодического процесса  $\omega$ . Эта частота называется *тоном* звука. Остальные частоты гармонического ряда, кратные  $\omega$  (т.е.  $n\omega$ , где  $n$  — целые числа), называются *обертонами*.

Коэффициенты  $C_n$ , являющиеся амплитудами соответствующих гармонических составляющих, могут принимать и нулевые значения.

Набор частот колебаний, присутствующих в данном звуке, называется его *акустическим спектром*. Звуки всех музыкальных инструментов имеют *линейчатый* акустический спектр такого типа (рис. 19). Если одну и ту же частоту или, как мы ее назвали, один звуковой тон воспроизвести на разных музыкальных инструментах, то мы легко отличим звук, созданный роялем или скрипкой. Это позволяет сделать именно различный спектральный состав звуков при одной и той же основной частоте. Относительная интенсивность обертонов определяет окраску или, как обычно говорят, *тембр* звука.

Заметим, что широко известные струнные смычковые музыкальные инструменты имеют не слишком широкий диапазон издаваемых звуковых тонов:

скрипка	— от 196	до 2000 Гц;
альт	— от 131	до 1100 Гц;
виолончель	— от 65	до 700 Гц;
контрабас	— от 41	до 240 Гц.

Однако при записи и последующем воспроизведении этих звуков необходимо пользоваться высококлассной аппаратурой, способной



работать в линейном режиме с широким диапазоном частот именно для того, чтобы не исказить обертона и не испортить, таким образом, тембр звуков.

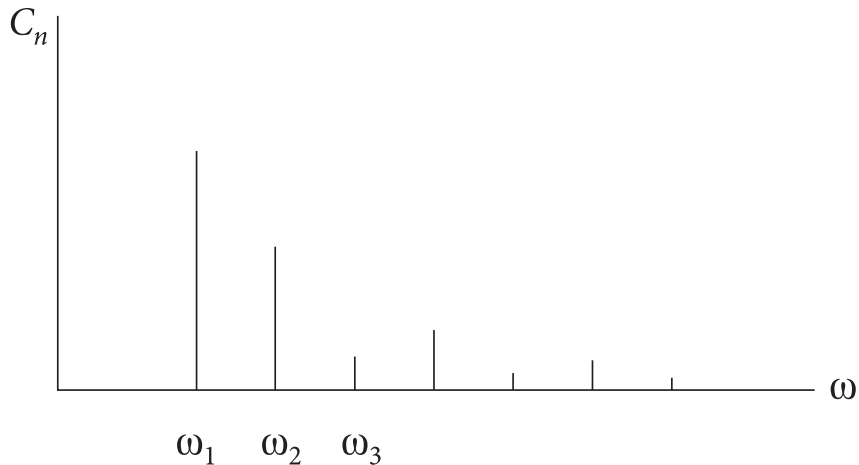


Рис. 19

Заметим, что диапазоны всех четырех смычковых инструментов могут быть расширены в руках искусных музыкантов за счет использования высоких гармоник путем легкого касания струн пальцами вместо прижимания их к грифу инструмента. Если слушать музыку только в записи и на плохой аппаратуре, то можно не понять, отчего же приходят в восторг слушатели в зале.

Особенностью духовых инструментов является неопределенность места отражения волны от открытого конца. В результате возникают обертоны, которые не являются гармониками основного тона. Степень негармоничности зависит от соотношения между диаметром раструба и длиной волны. В деревянных духовых инструментах на степень негармоничности влияет также толщина стенок корпуса инструмента, форма отверстий и клапанов. В итоге степень негармоничности индивидуальна для каждого инструмента, и их звук трудно повторим.

Некоторая негармоничность может быть и у струнных инструментов за счет не абсолютно жесткого закрепления струны на концах, небольшой подвижности опор, той или иной жесткости материала струны и т.д.

Существуют звуки, в которых присутствуют колебания всех частот в некотором интервале от  $\omega_1$  до  $\omega_2$  (рис. 20). Такой звук называется шумом, а его акустический спектр называется сплошным. На рис. 20 приведена зависимость амплитуды  $A$  от частоты  $\omega$  для шума.

Скорость распространения звука в воздухе при комнатной температуре  $v = 340$  м/с. С повышением температуры скорость возрастает пропорционально квадратному корню из абсолютной температуры:  $v \sim \sqrt{T}$ .

Очень важно, что звуковые волны не обнаруживают дисперсии, т.е. зависимости скорости от частоты. Это означает, что звуки разных частот распространяются с одинаковыми скоростями. Это и позволяет

нам наслаждаться музыкой, а также дает возможность слушать речь человека неискаженной по тембру на разных расстояниях от говорящего.

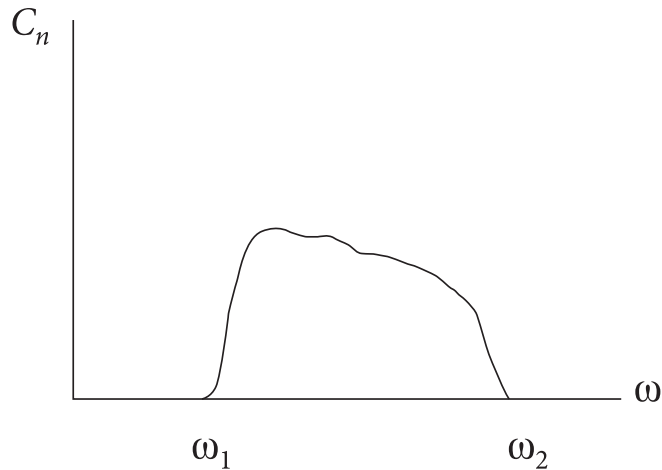


Рис. 20

Что такое приятные и неприятные звуки (*консонанс* и *диссонанс*) с точки зрения физики? Г. Л. Ф. Гельмгольц провел тщательное исследование проблемы консонанса и диссонанса и установил, что основной фактор в физике этих явлений — наличие *биений* между тонами или их высшими гармониками при одновременном звучании. Если биения быстрые, то результат воспринимается как наличие какой-то «грубости» в звуке. «Неприятность» звучания зависит и от субъективных факторов, связанных с нелинейными свойствами человеческого слуха. Из-за этой нелинейности мы слышим и *несуществующие в спектре гармоника* («не понимая», как нам кажется, композитора, а точнее, исполнителя; но, видимо, кое-кому кто-то действительно наступает на ухо).

Человек слышит звук не любой интенсивности. Довольно сложное устройство человеческого уха таково, что услышать звук оно может, только если интенсивность превысит некоторую минимальную величину, называемую *порогом слышимости*. Порог слышимости зависит от частоты звука: наиболее высокая чувствительность наблюдается в районе 3000 Гц. Порог слышимости при этом составляет в среднем (усреднение по многим людям)  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Почему максимальная чувствительность находится в районе 3000 Гц? Объяснение чисто физическое: все дело в резонансе столбика воздуха в человеческом *ушном канале*. Ушной канал представляет собой закрытую с одной стороны *барабанной перепонкой* акустическую трубку длиной примерно 2,7 см. Столбик воздуха внутри такого ушного канала резонирует на звук с длиной волны, равной четверем его длинам, что и соответствует 3000 Гц.

Звуковые колебания в ушном канале передаются барабанной перепонкой в так называемое среднее ухо, также заполненное воздухом и состоящее из системы небольших косточек, по форме напоминающих *молоточек, наковальню и стремя*. Колебания стремени передаются

улитке, которая представляет собой заполненную жидкостью свернутую трубку, внешне похожую на улитку. Колебания жидкости в улитке приводят в движение базальную мембрану и в конечном счете преобразуются в электрические сигналы, передаваемые мозгу.

При интенсивности  $1\text{--}10\text{ Вт/м}^2$  человек чувствует боль, и эти интенсивности называются *порогом болевого ощущения*.

Между этими порогами пользуются понятием *громкости* звука. *Уровнем громкости*  $L$  называют логарифм отношения интенсивности данного звука  $I$  к интенсивности  $I_0$ , принятой за начальную:

$$L = \lg \frac{I}{I_0}. \quad (2.24)$$

За начальную интенсивность  $I_0$  принимают уже отмеченный выше порог слышимости, равный  $10^{-12}\text{ Вт/м}^2$ . Единица уровня громкости, определяемого по формуле (2.24), называется *белом* (Б). Удобней пользоваться в 10 раз меньшей единицей — *децибелом* (дБ). Громкость в децибелах находится по формуле (2.25)

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}. \quad (2.25)$$

Для примера: громкость тихого разговора составляет примерно 40 дБ, громкой речи — 70 дБ, крика — 80 дБ, шум двигателя самолета на расстоянии 5 м — 120 дБ.

### О поисках секретов Страдивари

О скрипках Страдивари говорят и спорят столетиями. Что можно сказать с позиций современных исследований?

Корпус скрипки работает как усилитель слабых колебаний струны и является восхитительным достижением в истории музыки. Почти в современном виде он был создан в XVI в., а окончательно форма стабилизировалась в конце XVIII в. Корпус имеет сложную форму, даже толщина дерева в нем неодинакова. Нужна древесина различных пород: для верхней деки используется мягкая и узкослойная древесина (например, ель) со слоями, параллельными струнам, а для нижней деки (дна) — твердое дерево (например, клен или груша) со слоями, перпендикулярными струнам.

Подставка для струн, по идее, должна обеспечивать одинаковое усиление по всему диапазону инструмента. Но исследования 1959 г. показали, что движение струн заставляет подставку колебаться в два раза чаще, чем струна, что подчеркивает вторую гармонику в звучании скрипки.

Во второй половине XX в. Уильям Саундерс и Карлин Хачинз провели исследования относительной значимости различных параметров скрипки. Основной упор делался на исследование резонансов различных частей инструмента. Установлено, что резонансы воздушного объема не играют ведущей роли, более важными оказываются резонансы древесины. Но эти резонансы до сборки скрипки отличаются от резонансов после сборки, поэтому

предсказать качество очень непросто. Однако возможно найти некоторые соотношения между этими резонансами, а следовательно, повысить качество.

Опуская детали этих (и других) интересных исследований, скажем главное. Современные мастера уже могут сделать инструмент, который в руках виртуоза не отличим по звучанию от подлинных скрипок кремонских мастеров и самого Страдивари. Осталось решить одну проблему: на старинной скрипке даже новичок может извлечь удовлетворительный звук, а для получения такового на современной стандартной скрипке необходим первоклассный исполнитель.

---

## 2.18. Электрический заряд. Закон Кулона

Еще в прошлом веке трудно было представить, что есть какая-то глубокая связь между всем, что нас окружает, с электричеством. Однако теперь мы хорошо знаем, что физические и химические свойства вещества — от атома до живой клетки — не могут быть объяснены и поняты без учета электрических сил. Электрические заряды входят в состав любого тела, так как все тела состоят из атомов, а атом состоит из положительных и отрицательных зарядов.

Опыт показывает, что минимальный по величине заряд равен заряду электрона или протона. Его называют элементарным электрическим зарядом  $e$ :

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Отрицательный заряд оказался у электрона чисто случайно, так же как у протона — положительный. Можно было бы присвоить знаки и наоборот. Главное здесь в том, чтобы отразить фундаментальное свойство зарядов: они могут существовать в двух видах, причем одноименные заряды отталкиваются друг от друга, а разноименные — притягиваются.

Очень точные эксперименты показывают, что величина заряда не зависит от его скорости или от характера движения. Действительно, если бы такая зависимость имела место, то нарушалась бы электрическая нейтральность атомов, состоящих из равного количества положительных и отрицательных зарядов, но совершенно по-разному движущихся. Однако опыт указывает на электрическую нейтральность атомов. Величина заряда, измеренная в различных инерциальных системах отсчета, оказывается одинаковой. Это означает, что электрический заряд является *релятивистски инвариантным*.

Могут ли заряды исчезать? Могут. А могут ли они появляться? Тоже могут. Но есть важная особенность: всегда возникают и исчезают одновременно два элементарных заряда разных знаков. Например, электрон и позитрон (отличается от электрона только знаком заряда) при встрече аннигилируют, т.е. превращаются в нейтральные гамма-кванты, име-

ющие массу покоя, равную нулю. Но возможен и обратный процесс, называемый рождением пары, когда гамма-квант, пролетая вблизи атомного ядра, превращается в пару частиц — электрон  $-e$  и позитрон  $+e$ . Итак, можно сформулировать закон сохранения электрического заряда: *суммарный заряд электрически изолированной системы изменяться не может.*

Электрически изолированной является система, через ограничивающую поверхность которой не проникают заряженные частицы.

Физику неподвижных электрических зарядов изучает электростатика.

Французский физик Ш. О. Кулон опытным путем установил в 1785 г. закон: *сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме пропорциональна величинам зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль прямой, соединяющей заряды,*

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (2.26)$$

$k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбранной системы единиц. В гауссовой системе  $k = 1$ , в Международной системе единиц (СИ)

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

где  $\epsilon_0$  называется электрической постоянной:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Интересно, что будет, если вблизи выбранных двух зарядов появится третий: изменится сила взаимодействия зарядов, даваемая законом Кулона (2.24) или нет? Опыт показывает, что сила взаимодействия двух зарядов не изменяется, если вблизи них поместить другие заряды.

## 2.19. Напряженность электрического поля

Для характеристики электрического поля, возникающего вокруг любого неподвижного заряда удобно использовать отношение силы  $F$ , действующий на помещенный в поле заряд  $q$ , к величине этого заряда:

$$E = \frac{F}{q}. \quad (2.25)$$

Введение величины  $E$ , называемой *напряженностью электрического поля*, удобно тем, что  $E$  не зависит от величины помещаемого в поле заряда и характеризует именно свойства поля. Из определения напря-



женности (2.25) видим, что  $\mathbf{E}$  и по величине, и по направлению совпадает с силой, действующий на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Напряженность поля, создаваемого системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым зарядом:

$$\mathbf{E} = \sum \mathbf{E}_i.$$

Данное соотношение отражает *принцип суперпозиции электрических полей*.

Электрические поля можно изображать графически с помощью линий напряженности. Их условились проводить так, чтобы направление вектора  $\mathbf{E}$  в каждой точке было касательным к этим линиям, а плотность линий делается такой, чтобы число линий, пересекающих перпендикулярную к ним единичную площадку было пропорционально напряженности в данном месте. На рис. 21 приведены, в частности, поля точечных зарядов (положительного и отрицательного).

## 2.20. Потенциал и разность потенциалов

Напряженность  $\mathbf{E}$  является векторной характеристикой электрического поля. Но есть и скалярная характеристика, дополняющая информацию о нем. Это — потенциал  $\varphi$ .

*Потенциал  $\varphi$  численно равен работе, совершаемой силами поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки в бесконечность.*

Таким образом, потенциал характеризует способность поля совершать работу. Если в бесконечность удаляется не единичный, а любой другой заряд  $q$ , то совершаемая полем работа, естественно, равна

$$A_\infty = q\varphi. \quad (2.26)$$

Для потенциала, так же как и для  $\mathbf{E}$ , справедлив принцип суперпозиции: потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$\varphi = \sum \varphi_i.$$

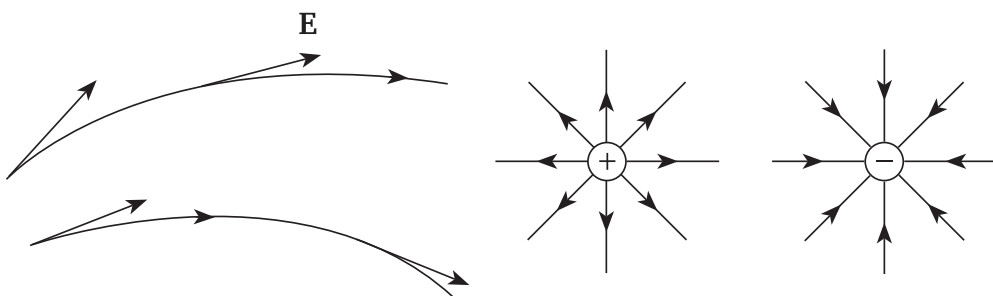


Рис. 21

Единицей потенциала в СИ является вольт (В). Потенциал в 1 В — это потенциал в такой точке, для перемещения в которую из бесконечности заряда в один кулон надо совершить работу в один джоуль.

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

Работу сил поля над зарядом  $q$  при его перемещении из одной точки в другую можно выразить через разность потенциалов:

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

## 2.21. Теорема Гаусса

Большое значение в физике имеет понятие потока вектора через поверхность. Рассмотрим его на примере потока  $\Phi$  вектора напряженности электрического поля  $E$  через поверхность  $S$ . Пусть, для начала, поле однородно, а поверхность плоская (рис. 22). В данном случае потоком  $\Phi$  вектора  $E$  через площадку  $S$  называется

$$\Phi = ES \cos \alpha = E_n S,$$

где  $\alpha$  — угол между  $E$  и нормалью  $n$  к площадке.

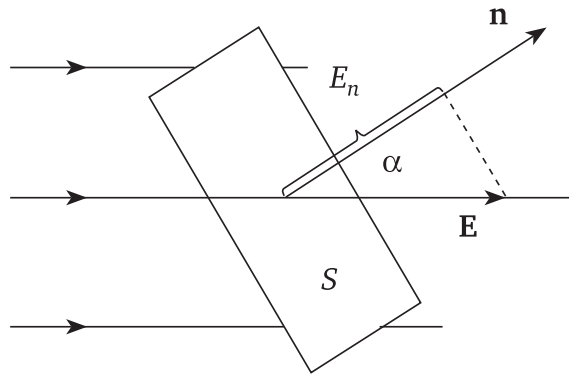


Рис. 22

В общем случае, когда поле неоднородно и поверхность не плоская, нужно разбить поверхность на столь малые участки, чтобы можно приближенно считать их плоскими, а поле в пределах такого участка однородным:

$$\Delta\Phi_i = E_{ni} \Delta S_i.$$

Полный поток через произвольную поверхность:

$$\Phi = \int_S E_n dS. \quad (2.27)$$

Поток через замкнутую поверхность обозначается так:

$$\Phi = \oint_S E_n dS. \quad (2.28)$$

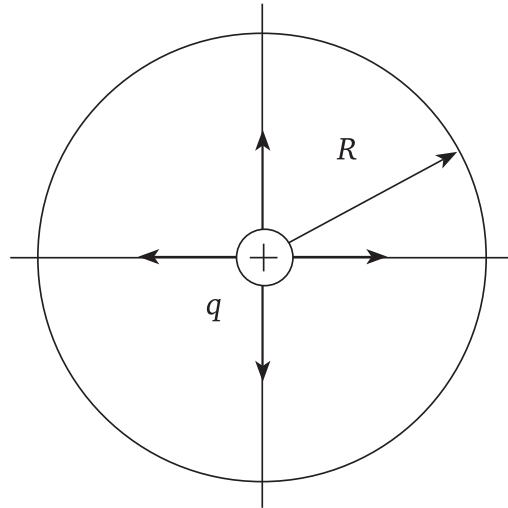


Рис. 23

Вычислим, для примера, поток вектора  $\mathbf{E}$  через сферическую поверхность радиуса  $R$  вокруг положительного точечного заряда  $q$ :

$$\Phi = \oint_S E_n dS = \oint_S \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} dS = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

Получаем, что поток не зависит от радиуса поверхности. Можно показать, что если внутри произвольной поверхности будет несколько зарядов, то имеет место аналогичное соотношение

$$\Phi = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i. \quad (2.29)$$

Это и есть теорема Гаусса: *поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на  $\epsilon_0$ .*

## 2.22. Проводники в электростатическом поле

Если сообщить проводнику заряд или поместить его во внешнее электростатическое поле (или то и другое одновременно), то через некоторое время, называемое временем релаксации в проводнике, устанавливается равновесное распределение заряда. При этом выполняются два условия.

1. *Электростатическое поле внутри проводника отсутствует:*

$$\mathbf{E} = 0.$$

В частности, если проводник заряжен и внешнее поле отсутствует, то заряды распределяются по проводнику так, что создаваемое ими поле отлично от нуля лишь вне проводника.

Если же во внешнее электростатическое поле помещен нейтральный проводник, то в нем произойдет перераспределение заряда (явление электростатической индукции) так, что поле индуцированных зарядов скомпенсирует поле внутри проводника (рис. 24).

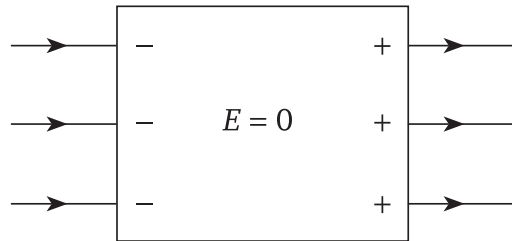


Рис. 24

2. Вектор напряженности на поверхности проводника перпендикулярен этой поверхности:

$$\mathbf{E} = E_n \cdot \mathbf{n}$$

Действительно, в противном случае существовала бы касательная к поверхности, составляющая напряженности электрического поля, что приводило бы к наличию поверхностных токов. Но при равновесном распределении зарядов это невозможно.

Поскольку поле внутри проводника равно нулю, работа по перемещению заряда также равна нулю. Следовательно, потенциал всех точек проводника одинаков. В частности, поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью. *Эквипотенциальной поверхностью* называют геометрическое место точек с одинаковым значением потенциала.

Нескомпенсированный заряд в проводнике распределяется только по его поверхности, а внутри проводника положительные и отрицательные заряды скомпенсированы. Распределение заряда зависит от размера проводника: плотность заряда максимальна на остриях и мала во впадинах. Поэтому поле вблизи острия сильное, а у впадины — слабое.

Итак, можно отметить важное свойство поля: *электростатическое поле не проникает в область, окруженную замкнутой металлической оболочкой*, т.е. такая оболочка обладает экранирующим действием от внешних электрических полей.

## 2.23. Электроемкость

Поскольку потенциал во всех точках проводника одинаков, можно просто говорить о *потенциале проводника*. Теория и опыт показывают, что потенциал проводника  $\phi$  пропорционален заряду проводника  $q$ :

$$\varphi = \frac{1}{C}q, \quad (2.30)$$

где  $\frac{1}{C}$  — коэффициент пропорциональности.

Величина  $C = \frac{q}{\varphi}$  постоянна для данного проводника и называется

*электрической емкостью* проводника. Емкость  $C$  имеет простой физический смысл: она численно равна заряду, который нужно сообщить проводнику, чтобы увеличить его потенциал на единицу.

Единица емкости в системе СИ называется фарадом (Ф): это емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл.

Емкость уединенных проводников обычно достаточно мала, поэтому для «конденсирования» больших зарядов в технике используют устройства, состоящие из двух проводников, называемых *обкладками*, расположенных близко друг к другу. Такие устройства называют *конденсаторами*. Например, это могут быть две плоские пластинки или две концентрические сферы (плоский и сферический конденсаторы). При помещении заряда  $q$  на одну из обкладок за счет электростатической индукции на другой обкладке возникает равный по величине и противоположный по знаку заряд ( $-q$ ). Из-за близости обкладок электрическое поле, создаваемое накопленными на них зарядами, сосредоточено внутри конденсатора.

*Емкостью конденсатора* называют отношение величины заряда на одной из обкладок к разности потенциалов между обкладками:

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

где  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$  называют *напряжением* между обкладками.

Для простейшего плоского конденсатора емкость в вакууме зависит от площади обкладки  $S$  и расстояния между пластинами  $d$  следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

При параллельном соединении конденсаторов емкости складываются:

$$C_{\text{парал}} = \sum C_i.$$

При последовательном соединении складываются величины, обратные емкостям отдельных конденсаторов, и результирующая емкость находится из выражения:



$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \sum \frac{1}{C_i}.$$

Заряженный конденсатор обладает энергией электрического поля, которая может выделиться, например, при разряде, если соединить пластины проводником. По проводнику пойдет ток, электрическое поле будет совершать работу по перемещению зарядов и равное этой работе количество теплоты выделится в пространство. Энергия  $W$  заряженного конденсатора равна

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2}qU. \quad (2.31)$$

При этом плотность энергии электрического поля определяется напряженностью  $E$  внутри конденсатора:

$$W = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2, \quad (2.32)$$

где  $V$  — объем конденсатора, в котором и сосредоточено электрическое поле.

## 2.24. Диэлектрики в электростатическом поле

*Диэлектриками* называют вещества, практически не проводящие электрический ток. Поэтому их иногда называют и изоляторами. Диэлектрики проводят ток в  $10^{15}$ — $10^{20}$  раз хуже, чем проводники.

Все диэлектрики состоят из молекул, которые можно разделить на две группы. Молекулы, у которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают (например,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) называют *неполярными*, так как их дипольный момент равен нулю.

Электрическим диполем называется система из двух одинаковых по величине и противоположных по знаку точечных зарядов. Ориентацию диполя в пространстве задают с помощью вектора  $\mathbf{l}$ , проведенного от отрицательного заряда к положительному (рис. 25). Электрическим моментом диполя, или просто *дипольным моментом*, называется вектор  $\mathbf{p}$ , равный

$$\mathbf{p} = q\mathbf{l}. \quad (2.33)$$

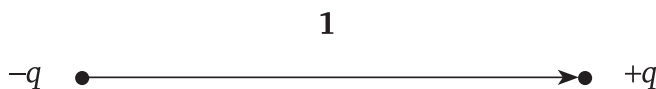


Рис. 25

Если у молекул диэлектрика центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают, то такие молекулы называют *полярными*, так как их дипольный момент  $\mathbf{p} \neq 0$ .

В электрическом поле неполярные молекулы становятся полярными, центры положительных и отрицательных зарядов теперь не совпадают. Говорят, что молекулы приобретают *индуцированный*, т.е. наведенный полем, дипольный момент.

На полярные молекулы поле оказывает, прежде всего, ориентирующее действие: векторы дипольных моментов, ориентированные без поля хаотически, при включении поля ориентируются преимущественно вдоль него.

В результате все диэлектрики в электростатическом поле приобретают дипольный момент. Это явление называется *поляризацией диэлектрика*. Количественной мерой поляризации является поляризованность диэлектрика  $\mathbf{P}$ , или *вектор поляризации*, определяемый следующим образом:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum \mathbf{P}_i, \quad (2.34)$$

где  $\mathbf{P}_i$  — дипольный момент отдельной молекулы; суммирование производится в физически бесконечно малом объеме  $\Delta V$ .

Поляризованный диэлектрик создает дополнительное электростатическое поле  $\mathbf{E}'$ , которое складывается с полем сторонних зарядов  $\mathbf{E}_0$ , в результате чего возникает результирующее поле  $\mathbf{E}$ :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'.$$

Молекулы испытывают действие именно этого поля  $\mathbf{E}$ . Из опыта следует, что независимо от типа молекул поляризованность большинства диэлектриков (за исключением сегнетоэлектриков) пропорциональна напряженности поля:

$$\mathbf{P} = \varkappa \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (2.35)$$

где  $\varkappa$  называется диэлектрической восприимчивостью,  $\varkappa$  не зависит от поля  $\mathbf{E}$  и характеризует свойства данного диэлектрика. Для диэлектриков с полярными молекулами  $\varkappa \sim \frac{1}{T}$ , сказывается дезориентирующее температурное влияние.

У диэлектриков с неполярными молекулами  $\varkappa$  практически не зависит от температуры.

При наличии диэлектриков теорема Гаусса (2.29) должна быть видоизменена, чтобы учесть присутствие поляризационных и неполяризационных зарядов диэлектрика:

$$\oint_S \mathbf{E}_n ds = \frac{1}{\varepsilon_0} (\sum q_i + \sum q_i^n),$$

где  $\sum q_i^n$  — суммарный поляризационный заряд;  $\sum q_i$  — суммарный сторонний заряд.

Обычно это выражение записывают проще, учитывая наличие поляризационного заряда диэлектрика, с помощью введения вектора *электрического смещения*  $\mathbf{D}$  (называемого еще вектором электрической индукции):

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}. \quad (2.36)$$

В этом случае теорема Гаусса приобретает простой вид

$$\oint_S D_n ds = \sum q_i, \quad (2.37)$$

где справа записан суммарный сторонний заряд, заключенный внутри замкнутой поверхности. Выражение (2.37) является записью теоремы Гаусса для  $\mathbf{D}$  в интегральной форме. Читается так: *поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме сторонних зарядов, заключенных внутри этой поверхности.*

Отметим, что сторонними или свободными мы называем заряды, расположенные как за пределами диэлектрика, так и внутри него, которые не входят в состав его молекул.

Выражение (2.36) можно упростить, учитывая выражение (2.35) для вектора поляризации  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varkappa \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon_0 (1 + \varkappa) \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}. \quad (2.38)$$

Безразмерная величина

$$\varepsilon = 1 + \varkappa \quad (2.39)$$

называется *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью* вещества.

## 2.25. Постоянный электрический ток

Вообще *электрическим током* называют упорядоченное движение электрических зарядов.

Заряд, переносимый через некоторую поверхность в единицу времени, называется *силой тока*  $I$ . Если за время  $dt$  переносится заряд  $dq$ , то

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (2.40)$$

*Постоянным* называется ток, не изменяющийся со временем.

Единицей силы тока в СИ является ампер (А). Ампер — это сила такого неизменяющегося тока, который проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызвал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

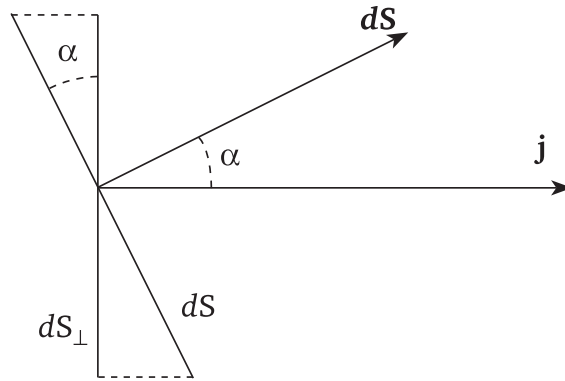


Рис. 26

Чтобы уметь более детально описывать, как распределяется ток по сечению проводника, вводится вектор плотности тока  $\mathbf{j}$  (см. рис. 26). За направление  $\mathbf{j}$  принимается направление скорости  $\mathbf{U}^+$  упорядоченного движения положительных зарядов.

По величине  $j = \frac{dI}{dS}$ , где  $dI$  — сила тока, текущего через площадку  $dS$

(см. рис. 26) перпендикулярную к направлению упорядоченного движения зарядов. Отсюда:

$$dI = j dS \cos \alpha = j_n dS,$$

где  $j_n$  — проекция  $\mathbf{j}$  на нормаль к  $dS$ ,

$$\mathbf{I} = \int_S \mathbf{j} dS = \int_S j_n dS.$$

Это означает, что сила тока равна потоку вектора плотности тока через заданную поверхность.

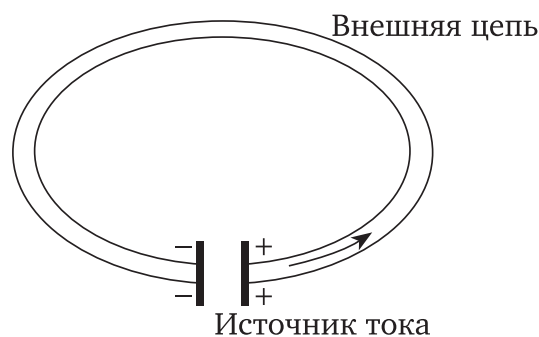


Рис. 27

Отметим, что скорость упорядоченного движения носителей тока невелика. Например, у меди (один из лучших проводников) она обычно не более 1 мм/с.

Для получения постоянного тока в проводнике одних электростатических сил недостаточно, так как под их действием заряды в конце концов распределятся так, что поле внутри проводника будет равно нулю. Значит, для поддержания тока необходимо наличие в цепи кроме электростатических сил еще и сил *неэлектростатического происхождения*, которые называются *сторонними силами*. Сторонние силы действуют в цепях постоянного тока *внутри источников тока*, например, внутри гальванического элемента или внутри аккумулятора. Природа сторонних сил здесь химическая. Какую роль выполняют сторонние силы? Они разделяют заряды. Сторонними силами могут быть и силы электрического (но не электростатического) происхождения, порождаемые переменными магнитными полями. Носители тока движутся во внешней цепи под действием электростатических сил, которые стремятся нейтрализовать заряды, сосредоточенные на обкладках источника тока. Чтобы не произошло убыли этих зарядов и затухания тока внутри источника, какие-то силы должны вновь разделить (+) и (-) заряды.

Для количественной характеристики сторонних сил вводится скалярная физическая величина, называемая электродвижущей силой (ЭДС). ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q};$$

$$\mathbf{F}_{\text{ст}} = q\mathbf{E}_{\text{ст}}.$$

Отсюда: *напряженность сторонних сил*  $\mathbf{E}_{\text{ст}}$  определяется как сторонняя сила, действующая на единичный положительный заряд:

$$\mathbf{E}_{\text{ст}} = \frac{\mathbf{F}_{\text{ст}}}{q}. \quad (2.41)$$

На участке 1—2

$$A_{12}^{\text{ст}} = \int_1^2 \mathbf{F}_{\text{ст}} d\mathbf{l} = q \int_1^2 \mathbf{E}_{\text{ст}} d\mathbf{l};$$

$$\varepsilon = \int_1^2 \mathbf{E}_{\text{ст}} d\mathbf{l}.$$

Результирующая сила, действующая на заряд  $q$  в цепи:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{ст}}).$$



Величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда, называется *падением напряжения*, или просто *напряжением*  $U$  на данном участке цепи:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}. \quad (2.42)$$

Если на участке нет сторонних сил, то

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2,$$

т.е., напряжение совпадает с разностью потенциалов на концах участка цепи. Участок, где нет сторонних сил, называется *однородным*.

Г. С. Ом экспериментально установил закон: сила тока в однородном (нет сторонних сил) металлическом проводнике пропорциональна напряжению:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{R}(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (2.43)$$

$R$  называется электрическим сопротивлением проводника. Единицей сопротивления является ом (Ом), равный сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении в 1 В течет ток силой 1 А.

Для однородного (материал) цилиндрического проводника

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

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление вещества. На рис. 28 приведена температурная зависимость удельного сопротивления для обычных металлов (кривая 1) и для сверхпроводников (кривая 2), когда при некоторой температуре, называемой критической ( $T_K$ ) сопротивление скачком уменьшается до нуля. Сверхпроводимость впервые обнаружена в 1911 г. Камерлинг-Оннесом.

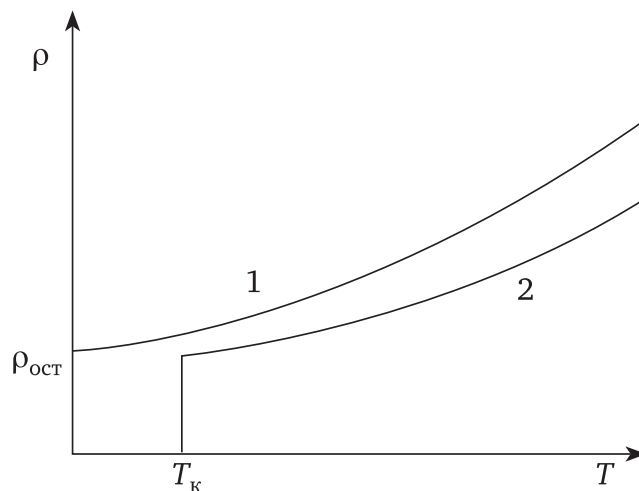


Рис. 28

До 1986 г. никак не удавалось получить вещества с  $T_k > 25$  К. Однако благодаря сенсационному открытию в конце 1986 г. Беднорцем и Мюллером явления *высокотемпературной сверхпроводимости* в некоторых оксидных соединениях удалось достаточно быстро получить материалы с  $T_k > 125$  К. В настоящее время проводятся интенсивные научные и технологические исследования по освоению этого выдающегося открытия.

Для расчета сложных разветвленных электрических цепей очень удобно пользоваться двумя *правилами Кирхгофа*.

Первое правило Кирхгофа: *алгебраическая сумма токов в узле равна нулю*,

$$\sum I_k = 0. \quad (2.44)$$

*Узлами* называются точки, где сходится более двух проводников. *Ветвью* называют участок цепи между двумя соседними узлами. Если в схеме имеется  $N$  узлов, то по первому правилу Кирхгофа можно записать  $N - 1$  независимых уравнений.

Второе правило Кирхгофа: *для любого замкнутого контура алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме действующих в этом контуре ЭДС* ^

$$\sum I_k R_k = \sum \varepsilon_k. \quad (2.45)$$

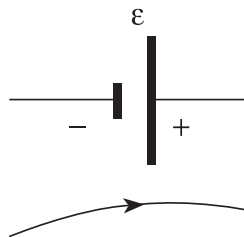


Рис. 29

Чтобы уравнения, записанные по второму правилу Кирхгофа, были независимыми, необходимо, чтобы в каждом новом выбранном контуре была хотя бы одна новая ветвь, не вошедшая в предыдущие контуры.

Число независимых уравнений по обоим правилам Кирхгофа оказывается равным количеству токов в схеме (а токов в схеме, вообще говоря, столько, сколько ветвей).

Знак падения напряжения при записи уравнения по второму правилу Кирхгофа берется «плюс», если выбранное направление обхода совпадает с выбранным направлением тока в данной ветви. Если ЭДС действует по направлению обхода, то ее записывают со знаком «плюс», как на рис. 29.

Электрический ток, текущий в проводнике, совершает работу и вызывает нагревание проводника. Дж. Джоуль и независимо от него

Э. Х. Ленц (русский физик) экспериментально установили, что количество выделившейся в проводнике теплоты пропорционально его сопротивлению, квадрату силы тока и времени:

$$Q = RI^2t. \quad (2.46)$$

Соотношение (2.46) выражает закон Джоуля — Ленца.

Природа носителей тока в металлических проводниках была установлена экспериментально Т. Толменом и Р. Стюартом в 1916 г. Они использовали идею Г. А. Лоренца, согласно которой при резком торможении быстро движущегося металлического проводника носители тока должны некоторое время двигаться по инерции. Реализовав эту идею с быстро вращающейся катушкой, Толмен и Стюарт показали, что носителями тока в металлах являются электроны.

## 2.26. Магнитное поле. Современные представления о природе магнитных взаимодействий

Опыт показывает, что любые движущиеся заряды взаимодействуют между собой. Например, два параллельных проводника с током притягиваются друг к другу, если направления токов совпадают, и отталкиваются друг от друга, если направления токов противоположны. Говорят, что взаимодействие токов осуществляется посредством поля, называемого магнитным. Магнитное поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды действуют силы. На покоящийся заряд магнитное поле влияния не оказывает. Разумеется, магнитное поле возникает вокруг любых движущихся зарядов.

Поскольку в состав любого атома входят движущиеся заряды, то магнитными свойствами обладают все тела, как живые, так и неживые. Поэтому глубокое понимание окружающего нас мира совершенно невозможно без понимания природы магнетизма и его основных законов.

Можно ли без длительного анализа развития исторических представлений о магнетизме коротко выразить суть современного понимания природы магнитных взаимодействий? Можно, если воспользоваться такими достижениями физики XX в., как создание А. Эйнштейном специальной теории относительности. Покажем, основываясь на постулатах теории относительности и на релятивистской инвариантности электрического заряда, что магнитное взаимодействие токов является неизбежным следствием закона Кулона. Рассмотрим это на примере взаимодействия проводника с током и движущегося заряда  $q$ .

Пусть на рис. 30 положительные заряды, изображенные черными кружками, движутся вправо со скоростью  $V_0$ , а отрицательные заряды — влево с той же скоростью  $V_0$ . Линейные плотности тех и других зарядов данного проводника с током по величине равны друг другу:  $\lambda_+ = \lambda_-$ .

Поскольку за направление тока выбирают направление движения положительных зарядов, то в данном случае ток направлен вправо. Пусть также вправо движется заряд  $q$  со скоростью  $V$ . Наша задача — показать, что взаимодействие между токами может быть найдено без привлечения понятий магнитного поля, с использованием только закона Кулона и элементарных соотношений теории относительности.

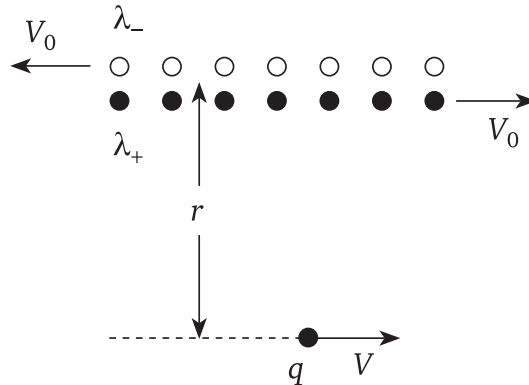


Рис. 30

Чтобы воспользоваться законом Кулона, нужно, чтобы заряд  $q$  покоился. Поэтому перейдем в систему отсчета, которая движется вправо со скоростью  $V$ . В этой системе скорость движения положительных зарядов уменьшится по сравнению с  $V_0$ . При этом длина любого участка проводника увеличится (в соответствии с соотношениями теории относительности, рассматриваемыми ниже), а величина заряда такого участка проводника останется прежней (в соответствии с релятивистской инвариантностью заряда, что является опытным фактом). Следовательно, линейная плотность положительных зарядов  $\lambda'_+$  в движущейся системе станет меньше, чем в лабораторной системе. Легко видеть, что аналогичное рассуждение в применении к отрицательным зарядам проводника с током приводит к выводу об увеличении линейной плотности  $\lambda'$  в движущейся системе отсчета. Итак, имеем:

$$\begin{aligned}\lambda'_+ &< \lambda_+; \\ \lambda'_- &> \lambda_-.\end{aligned}$$

Таким образом, по наблюдениям в движущейся системе проводник оказывается отрицательно заряженным, хотя в неподвижной, лабораторной системе он был электрически нейтрален. А отрицательно заряженный проводник и положительный заряд  $q$ , разумеется, притягиваются, что и требовалось доказать.

Если воспользоваться конкретными соотношениями теории относительности, то легко получить и конкретное выражение для силы взаимодействия параллельных токов в нашем примере:

$$F = qV \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r}.$$

Здесь  $I = 2\lambda V_0$  — величина тока в проводнике;  $\mu_0$  — магнитная постоянная,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Итак, мы показали, что взаимодействие токов можно описывать без всякого использования понятия магнитного поля. Так что же получается, на этом можно и закрыть тему и не тратить усилий на изучение законов магнетизма? Нет. Дело в том, что указанный способ решения задач обладает существенным недостатком: для анализа системы движущихся зарядов нам приходилось бы постоянно совершать преобразования «вперед-назад» между разнообразными системами координат, что технически всегда утомительно. Есть лучший способ. Общее действие одного тока на другой можно хорошо описать, вводя понятие о новом поле — магнитном. Магнитное поле характеризуют вектором  $\mathbf{B}$ , который иногда называют вектором магнитной индукции.

Для рассмотренного нами случая — магнитного поля прямолинейного тока — вектор  $\mathbf{B}$  вводится следующим образом:

$$|\mathbf{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r}.$$

По направлению  $\mathbf{B}$  перпендикулярен к плоскости (см. рис. 30), т.е. перпендикулярен как к проводнику, так и к скорости заряда  $V$ . С учетом направлений выражение для силы, действующей на движущийся в магнитном поле заряд, можно записать:

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{VB}]. \quad (2.47)$$

Эта сила называется *силой Лоренца*.

$\mathbf{B}$  является основной характеристикой магнитного поля, и мы будем говорить, в основном, «магнитное поле  $\mathbf{B}$ », что лучше, чем «магнитная индукция  $\mathbf{B}$ ». Но существует и другая характеристика магнитного поля, называемая напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$ .  $\mathbf{H}$  является вспомогательной характеристикой магнитного поля, и ее введение обусловлено существованием в природе двух принципиально отличных друг от друга токов — свободных и связанных.

Свободные токи — токи свободно движущихся зарядов, которые можно измерить с помощью приборов (амперметров). Связанные токи — токи движущихся зарядов, которые в принципе невозможно измерить прибором, например, токи движущихся электронов в атоме или токи протонов в ядрах атомов. Вклад в магнитное поле  $\mathbf{B}$  вносят и те, и другие заряды. Движению свободных зарядов соответствует напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$ , а магнитное поле в веществе находится с помощью следующего соотношения:

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}, \quad (2.48)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость, или просто магнитная проницаемость вещества;  $\mu_0$  — безразмерная величина.

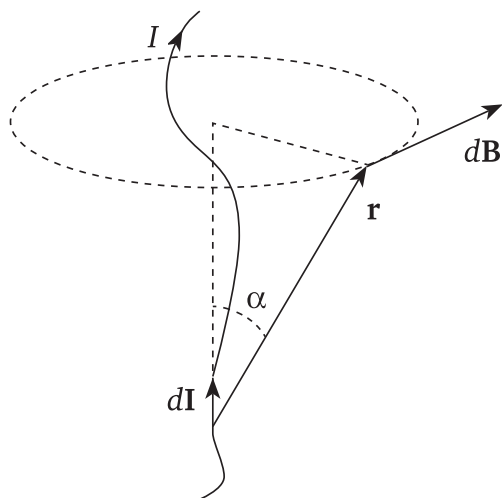


Рис. 31

Единицей  $\mathbf{B}$  в системе СИ является тесла (Тл), а единицей  $\mathbf{H}$  — ампер на метр (А/м).

## 2.27. Основные законы магнетизма

Принципиальное значение имеют два закона: закон Био — Савара — Лапласа и закон Ампера.

Чтобы уметь вычислять магнитное поле, создаваемое произвольным током, необходимо знать поле, создаваемое элементом тока. *Элементом тока* называется произведение величины тока  $I$  на  $d\mathbf{l}$ :  $I \cdot d\mathbf{l}$ , где  $d\mathbf{l}$  — вектор, совпадающий с элементарным участком тока длины  $dl$  и направленный по току (рис. 31). Ж.-Б. Био, Ф. Савар и П.-С. Лаплас на основе анализа экспериментальных данных установили выражение для магнитного поля  $d\mathbf{B}$ , создаваемого произвольным элементом тока  $I d\mathbf{l}$ :

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l}\mathbf{r}]}{r^3}, \quad (2.49)$$

где  $\mathbf{r}$  — вектор, проведенный от элемента тока в точку определения поля. Соотношение (2.49) называется *законом Био — Савара — Лапласа*. С его помощью можно вычислить магнитное поле, создаваемое любым током в любой точке пространства, необходимо только воспользоваться принципом суперпозиции и сложить (векторно) все поля, создаваемые всеми элементами тока.

Допустим, что с помощью закона Био — Савара — Лапласа мы нашли поле  $\mathbf{B}$ , создаваемое током  $I_1$  в точке  $A$  (рис. 32). Чтобы найти силу, действующую на другой провод с током  $I$ , нужно уметь записывать



выражение для силы, действующей на элемент тока  $I \cdot d\mathbf{l}$ . Это позволяет сделать закон, установленный экспериментально Ампером:

$$d\mathbf{F} = I[d\mathbf{l}\mathbf{B}]. \quad (2.50)$$

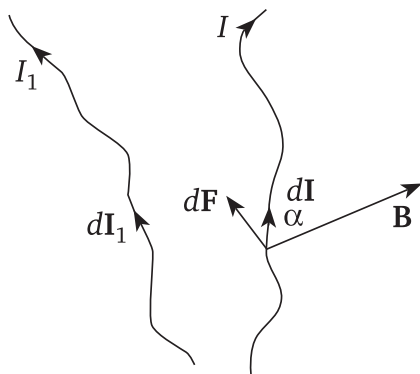


Рис. 32

Зная магнитное поле  $\mathbf{B}$ , создаваемое током  $I_1$  во всех точках проводника  $l$ , можно найти силу  $\mathbf{F}$ , действующую на проводник с током в магнитном поле, просуммировав все элементарные силы  $d\mathbf{F}$ .

Таким образом, совокупность законов Био — Савара — Лапласа и Ампера в принципе позволяет рассчитать любое взаимодействие проводников с током. Другое дело, что не всегда это возможно получить в аналитическом виде из-за сложностей формы произвольных токов.

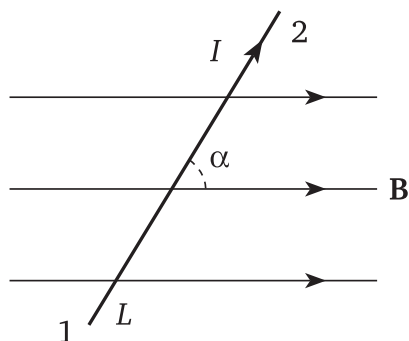


Рис. 33

Определим, для примера, силу, действующую на прямолинейный проводник длины  $L$  с током  $I$ , находящийся в постоянном однородном магнитном поле  $\mathbf{B}$  (рис. 33).

$$\mathbf{F} = \int_1^2 d\mathbf{F} = I \left[ \int_1^2 d\mathbf{l}\mathbf{B} \right] = I[\mathbf{L}\mathbf{B}].$$

Если  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то

$$|\mathbf{F}| = ILB.$$

## 2.28. Поток и циркуляция вектора $\mathbf{B}$

В отличие от электрических зарядов, в природе не существует магнитных зарядов, поэтому линии магнитного поля  $\mathbf{B}$  не имеют ни начала, ни конца. Они либо замкнуты, либо уходят в бесконечность. В результате оказывается, что *поток вектора  $\mathbf{B}$  через любую замкнутую поверхность  $S$  равен нулю:*

$$\Phi_B = \oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \oint_S B_n dS = 0. \quad (2.51)$$

Выражение (2.51) называется теоремой Гаусса для вектора  $\mathbf{B}$ . *Циркуляцией* вектора  $\mathbf{B}$ , по определению, является интеграл

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l},$$

где  $d\mathbf{l}$  — элемент замкнутого контура.

Можно показать, что циркуляция вектора  $\mathbf{B}$  определяется *алгебраической* суммой токов, пересекающих поверхность, ограниченную контуром:

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_k I_k. \quad (2.52)$$

Соотношение (2.52) выражает теорему о циркуляции магнитного поля  $\mathbf{B}$ .

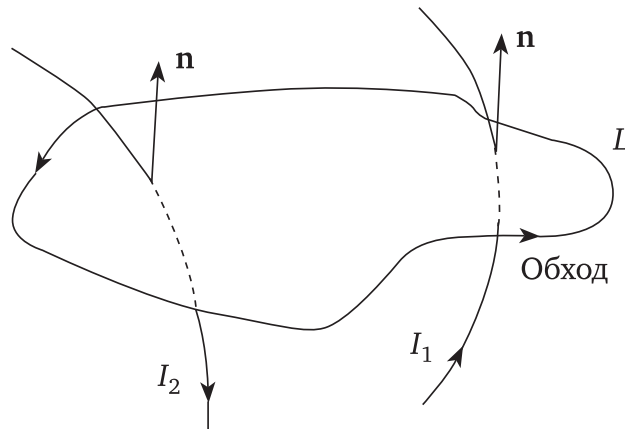


Рис. 34

Знак силы тока определяется следующим образом: если ток пересекает поверхность под острым углом с нормалью к ней ( $I_1$  на рис. 34), то он берется со знаком «плюс», если под тупым углом ( $I_2$  на рис. 34), то со знаком «минус». Направление нормалей согласовывается с направлением обхода контура правилом правого буравчика: ручка буравчика вращается по обходу контура, а поступательное движение буравчика указывает направление нормали.

Отметим, что если контур не замкнут, то  $\int_1^2 \mathbf{B}d\mathbf{l}$  зависит не только

от положения начальной и конечной точек 1 и 2, но и от формы кривой. Поэтому в магнитном поле нельзя ввести величину, аналогичную потенциалу в электростатике. В отличие от электростатического поля, являющегося потенциальным, магнитное поле непотенциально. Поле, у которого циркуляция отлична от нуля, называется *вихревым*. Магнитное поле — вихревое поле.

## 2.29. Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции открыто М. Фарадеем в 1831 г. с помощью анализа экспериментальных данных. Оно заключается в том, что при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в этом контуре возникает ток, называемый индукционным током. Это означает, что в контуре возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ , которая не зависит от способа изменения магнитного потока  $\Phi = \oint_S \mathbf{B}d\mathbf{S}$  и определяется только скоростью изменения потока:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.53)$$

Соотношение (2.53) называют *законом Фарадея*. Знак «минус» здесь отражает правило Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Единицей потока магнитной индукции является вебер (Вб). Это поток через поверхность в  $1 \text{ м}^2$ , пересекаемую перпендикулярными к ней линиями однородного магнитного поля с  $B = 1 \text{ Тл}$ .

Если скорость изменения магнитного потока составляет  $1 \text{ Вб/с}$ , то согласно закону Фарадея в контуре индуцируется ЭДС  $\varepsilon_i$ , равная  $1 \text{ В}$ . Частным случаем электромагнитной индукции является *самоиндукция*. Если текущий в контуре ток изменяется, то это вызывает изменение магнитного потока, вследствие чего в контуре индуцируется ЭДС. Это явление и называется самоиндукцией.

По закону Био — Савара — Лапласа магнитное поле  $B$  пропорционально вызывающему его току:  $B \sim I$ . Магнитный поток  $F \sim B$ . В результате оказывается, что магнитный поток пропорционален создающему его току в контуре:

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью* контура.

Индуктивность зависит от геометрии контура, определяемой его размерами и формой, а также от магнитных свойств среды, в которой находится контур (магнитные свойства среды характеризуются магнитной проницаемостью  $\mu$ ). Для жесткого контура в вакууме индуктивность постоянна.

Единицей индуктивности является генри (Гн). Это индуктивность такого контура, у которого при силе тока в нем в 1 А возникает связанный с ним полный магнитный поток в 1 Вб.

По правилу Ленца токи самоиндукции направлены так, чтобы противодействовать изменениям тока в цепи. Поэтому установление тока при замыкании или размыкании цепи происходит не мгновенно, а постепенно.

### 2.30. Энергия магнитного поля контура с током

При замкнутом ключе  $K$  в контуре  $L$ , изображенном на рис. 35, установится какой-то ток  $I$ , создающий магнитное поле. При размыкании ключа  $K$  вследствие самоиндукции ток в цепи исчезнет не сразу и через сопротивление  $R$  некоторое время будет течь постепенно убывающий ток, поддерживаемый в контуре ЭДС самоиндукции. В процессе исчезновения тока на сопротивлении выделится теплота, равная работе, совершенной в цепи. Вычисление этой работы для случая  $L = \text{const}$ , когда нет деформации проводника и отсутствуют вещества с нелинейной зависимостью намагниченности от поля (ферромагнетики), приводит к следующему выражению для энергии  $W$  магнитного поля, создаваемого контуром с током:

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

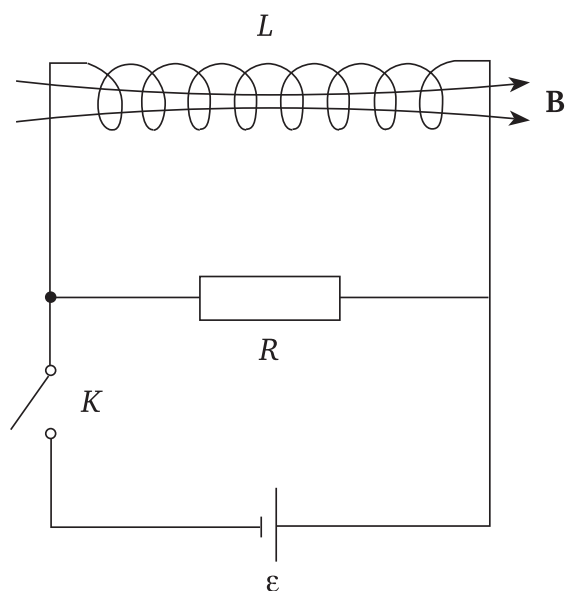


Рис. 35

## 2.31. Намагничивание вещества

Магнитными свойствами обладают все вещества. При помещении в магнитное поле  $\mathbf{B}_0$  все вещества в той или иной степени намагничиваются, т.е. приобретают магнитный момент и создают дополнительное магнитное поле  $\mathbf{B}'$ , складывающееся с полем  $\mathbf{B}_0$ . Результирующее поле

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'.$$

Намагничивание вещества характеризуют магнитным моментом единицы объема, который называют *намагниченностью* и обозначают буквой  $\mathbf{J}$  ( $\mathbf{J}$  — вектор намагничивания).

Если вещество намагничено неоднородно, то намагниченность определяется так:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \mathbf{p}_m, \quad (2.55)$$

где  $\Delta V$  — физически бесконечно малый объем в окрестности данной точки;  $\mathbf{p}_m$  — магнитный момент отдельной молекулы.

Магнитный момент контура с током определяется следующим образом:

$$\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n}, \quad (2.56)$$

где  $I$  — сила тока в контуре;  $S$  — площадь контура;  $\mathbf{n}$  — единичный вектор вдоль положительной нормали к площади контура (рис. 36). Положительная нормаль связана с направлением тока правилом правого винта.

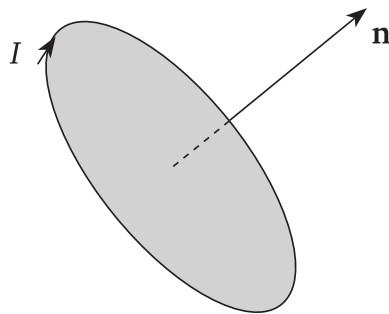


Рис. 36

Опыт показывает, что намагниченность вещества пропорциональна  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}. \quad (2.57)$$

Коэффициент пропорциональности  $\chi$  называется *магнитной восприимчивостью* вещества.

Для слабомагнитных веществ (диа- и парамагнетиков)  $\chi$  не зависит от приложенного поля  $\mathbf{H}$ , если это поле не слишком велико.

Магнитная восприимчивость  $\chi$  и магнитная проницаемость  $\mu$ , характеризующая магнитные свойства одного и того же вещества, достаточно просто связаны между собой:

$$m = 1 + \chi. \quad (2.58)$$

## 2.32. Простейшая классификация магнитных веществ

Современная физика магнитных явлений выделяет более 10 типов магнитных материалов, и это число постоянно возрастает по мере развития науки. Мы вынуждены здесь ограничиться самой простой классификацией. В зависимости от знака и числового значения магнитной восприимчивости все вещества можно разделить на три группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

*Диамагнетиками* называют вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью ( $\chi < 0$ ). Абсолютное значение  $\chi$  для них очень мало, порядка  $10^{-5}$ — $10^{-7}$ . Типичными представителями диамагнетиков являются инертные газы, многие органические соединения, ряд металлов (например, чистая медь).

Вещества с положительной восприимчивостью ( $\chi > 0$ ) порядка  $10^{-3}$ — $10^{-6}$  называют *парамагнетиками*. Примеры парамагнетиков: молекулярный кислород  $O_2$ , окись азота  $NO$ , щелочные металлы, соли редких земель и элементов группы железа.

У *ферромагнетиков* магнитная восприимчивость положительна ( $\chi > 0$ ) и очень велика, достигая величин порядка  $10^5$ — $10^6$ . К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель, многие сплавы и соединения.

Природа диамагнетизма обусловлена тем, что при внесении любого атома в магнитное поле все электроны атома получают дополнительное движение, создающее индуцированный магнитный момент, направленный против внешнего магнитного поля. Таким образом, диамагнетизмом в какой-то степени обладают все вещества, но в явном виде он проявляется только тогда, когда суммарный магнитный момент атома равен нулю.

У парамагнетиков собственный магнитный момент атомов не равен нулю. Но без внешнего магнитного поля тепловое движение приводит к их хаотической ориентации в пространстве. При помещении парамагнетика в магнитное поле оно стремится установить атомные магнитные моменты вдоль поля. В зависимости от величины температуры это удается сделать в большей или меньшей степени. Приобретаемый ориентационный магнитный момент значительно превосходит индуцированный диамагнитный момент, и вещество в целом проявляет парамагнитные свойства.



Пьер Кюри экспериментально установил, что магнитная восприимчивость парамагнетиков обратно пропорциональна температуре:

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (2.59)$$

где  $C$  — постоянная Кюри, зависящая от вещества. Выражение (2.59) называют *законом Кюри*. Отметим, что у диамагнетиков магнитная восприимчивость от температуры практически не зависит.

Намагниченность диа- и парамагнетиков пропорциональна величине приложенного поля.

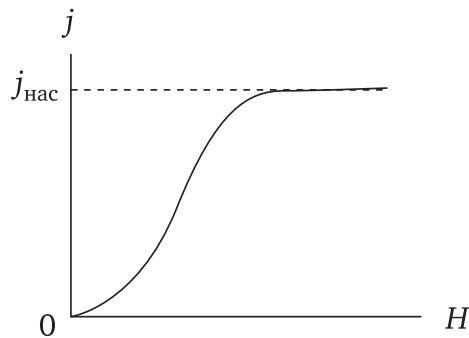


Рис. 37

Сложнее зависит от  $H$  намагниченность ферромагнетиков. На рис. 37 приведена типичная кривая намагничивания ферромагнетика, намагниченность которого сначала была равна нулю. Такая зависимость называется основной, или нулевой кривой намагничивания. При некотором поле намагниченность достигает насыщения.

В соответствии с определением напряженности магнитного поля

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{J}. \quad (2.60)$$

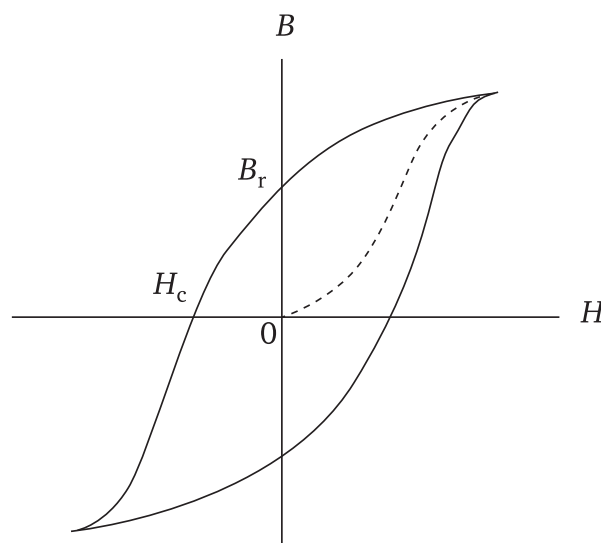


Рис. 38

Отсюда  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J})$ . Если изменять поле  $H$  по величине и направлению, то получим характерную для ферромагнетиков кривую, называемую петлей гистерезиса. Она приведена на рис. 38.

Величина  $B_r$  называется остаточной индукцией, а напряженность  $H_c$  — коэрцитивной силой. Наличие остаточной индукции делает возможным изготовление постоянных магнитов, т.е. источников магнитного поля. Чем больше коэрцитивная сила  $H_c$ , тем лучше магнит сохраняет свои свойства, потому что тем большее поле нужно будет приложить, чтобы довести его намагниченность до нуля.

Если ферромагнетик нагревать, то при некоторой температуре  $T_c$ , называемой точкой Кюри, ферромагнетик теряет свои свойства и становится парамагнетиком. При понижении температуры ниже  $T_c$  ферромагнитные свойства восстанавливаются. Точка Кюри для железа равна  $768^\circ\text{C}$ .

Природа ферромагнетизма достаточно сложна и в рамках классической физики не объясняется. Только после создания квантовой механики было показано, что в ферромагнетиках особые силы, называемые обменными (и объясняемые только в квантовой механике), заставляют собственные (спиновые) магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. Спин электрона обусловлен не движением электрона в пространстве, а внутренним движением вещества в электроне, которое не может быть сведено к обычному классическому вращению.

В ферромагнетиках обменные силы выстраивают спиновые магнитные моменты электронов параллельно друг другу в пределах небольших областей, которые называют доменами. В каждом домене ферромагнетик спонтанно (самопроизвольно, т.е. без приложения внешнего магнитного поля) намагничен до насыщения, но суммарные магнитные моменты различных доменов имеют разные направления и для всего тела в отсутствие внешнего магнитного поля магнитный момент оказывается равным нулю (рис. 39). Обычно размеры доменов порядка 1—10 мкм.

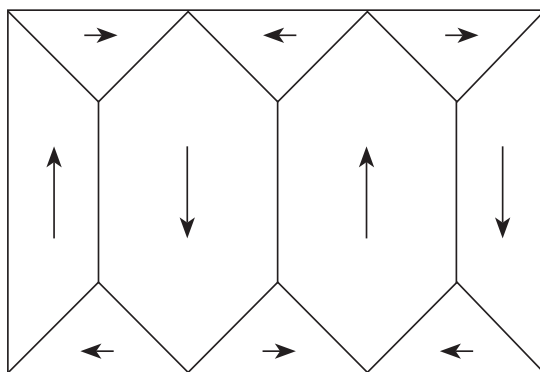


Рис. 39

При помещении ферромагнетика в магнитное поле наблюдается как смещение границ доменов (в слабых полях), в результате чего растут

домены, магнитные моменты которых составляют с направлением  $H$  меньший угол, так и поворот (вращение) магнитных моментов доменов в направлении поля (при больших полях). Характерно, что эти процессы внутри ферромагнетика являются необратимыми, что и приводит к гистерезису.

### 2.33. Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли напоминает поле полосового магнита или поле магнитного диполя (рис. 40). *Северным полюсом магнита называется тот, из которого выходят магнитные силовые линии.* Конец магнитной стрелки компаса, указывающий на север, является северным полюсом магнита (N). Если учесть, что разноименные полюсы магнитов притягиваются, то получаем, что северный (N) полюс магнитной стрелки притягивается к южному магнитному полюсу Земли, который расположен недалеко от географического северного полюса.

Магнитная ось наклонена к оси вращения на  $11,5^\circ$ . Отсюда и возникает склонение, т.е. несовпадение магнитных меридианов с географическими.

Магнитный момент земного диполя

$$M = 8 \cdot 10^{15} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Если говорить точнее, то поле Земли лучше описывается, если считать, что ось диполя отстоит от центра Земли на 462 км (1970 г.) в направлении Тихого океана. Поэтому говорят, что поле Земли — это поле эксцентричного диполя.

Без учета различных аномалий максимум магнитного поля достигается на северном магнитном полюсе (Антарктида),  $B_{\max} = 0,68$  Гс. Минимум магнитного поля наблюдается в Бразилии:  $B_{\min} = 0,24$  Гс. Имеют место различные магнитные аномалии. Например, в районе Курской аномалии  $B \approx 2$  Гс.

*Магнитное поле Земли изменяется со временем.* Например, с 1829 г. по настоящее время наблюдается убывание по линейному закону

$$M = (7,98 - 0,004t) \cdot 10^{15} \text{ А} \cdot \text{м}^2,$$

где  $t$  — время в годах, отсчитанное вперед или назад от 1970 г.

За 100 лет магнитное поле Земли уменьшилось более чем на 5%. Одновременно наблюдалось и перемещение магнитных полюсов на несколько градусов. Смещение эксцентричного диполя Земли увеличилось с 252 км в 1829 г. до 462 км в 1970 г.

Согласно археомагнитным и палеомагнитным данным, в далеком прошлом неоднократно наблюдалась смена полярности магнитного поля Земли. За последние 9000 лет полярность магнитного поля Земли не изменялась.

Какова природа магнитного поля Земли? Известно, что ядро Земли находится в жидком состоянии и оно электропроводно. За счет радиоактивного распада в ядре происходит энерговыделение, вызывающее конвективные движения в нем. Кроме того, земное ядро и вращается вместе с корой. В результате сложного движения проводящего жидкого вещества в земном ядре и создается магнитное поле Земли.

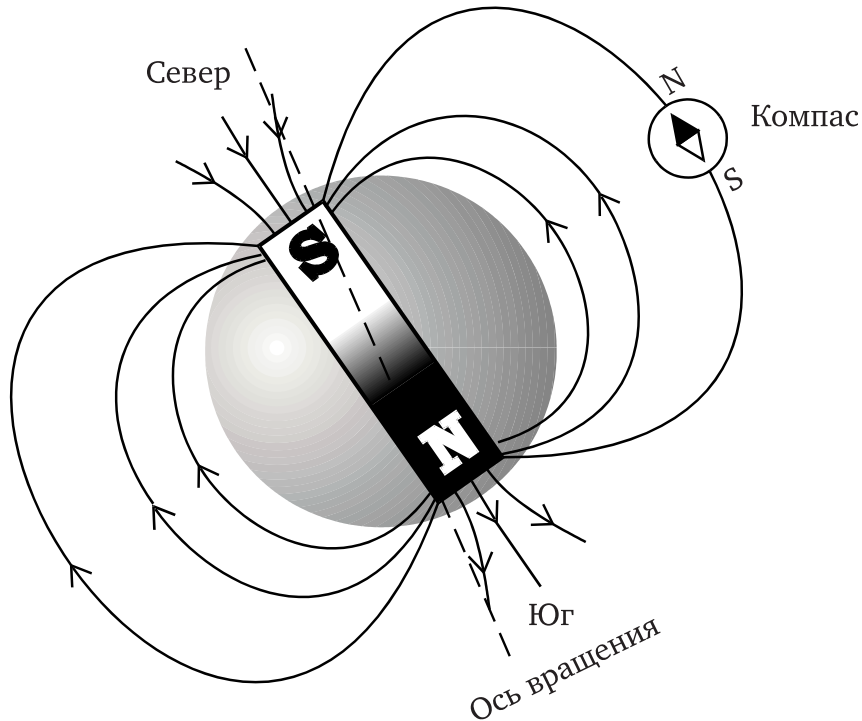


Рис. 40

## 2.34. Переменный электрический ток. Закон Ома

Широко используемый в быту и на производстве переменный электрический ток представляет собой вынужденные электромагнитные колебания, причем сила тока и напряжение меняются со временем по простейшему гармоническому закону

$$I = I_0 \sin \omega t.$$

Важнейшая особенность переменного тока — наличие сдвига фаз между током и напряжением. Это обусловлено особенностями индуктивного и емкостного сопротивлений (рис. 41). Найдем, например, связь между током и напряжением на емкости  $C$ :

$$U_C = \frac{q}{C}; \quad I = \frac{dq}{dt}; \quad dq = Idt;$$

$$q = \int Idt = \int I_0 \sin \omega t dt = -\frac{I_0}{\omega} \cos \omega t = \frac{I_0}{\omega} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right);$$

$$U_C = \frac{I_0}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

т.е. напряжение на конденсаторе *отстает* по фазе от тока на  $\frac{\pi}{2}$ . Максимальные (амплитудные) значения тока и напряжения в этом случае связаны следующим соотношением:

$$U_{C_0} = \frac{I_0}{\omega C}. \quad (2.61)$$

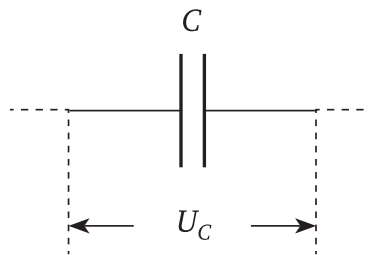


Рис. 41

Выражение (2.61) называют законом Ома для участка цепи с емкостью. Сравнивая это выражение с обычным законом Ома  $U = IR$  видим, что роль сопротивления здесь играет

$$R_C = \frac{1}{\omega C},$$

где  $R_C$  называют сопротивлением емкости переменному току или емкостным сопротивлением.

Аналогично можно получить и индуктивное сопротивление  $R_L$ :

$$R_L = \omega L,$$

причем напряжение на индуктивности  $L$  *опережает* по фазе ток на  $\frac{\pi}{2}$ .

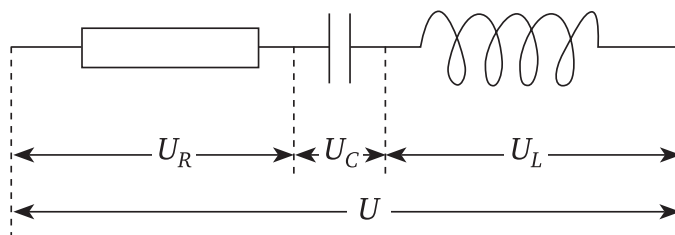


Рис. 42

Если в цепи есть все три типа сопротивлений (рис. 42), то сдвиги фаз хорошо видны на так называемой векторной диаграмме (рис. 43).

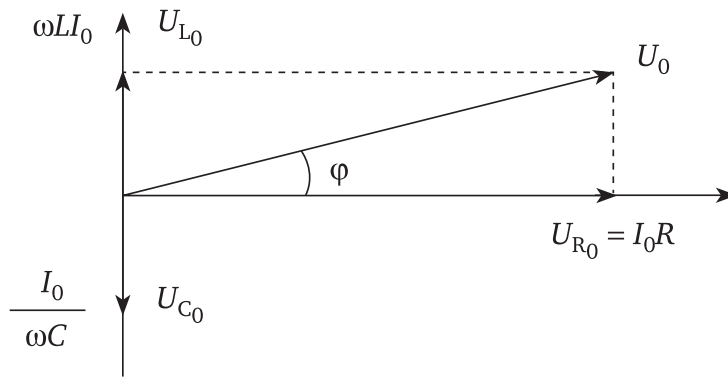


Рис. 43

Из рис. 43 по теореме Пифагора легко получаем связь между током и напряжением в данной цепи, т.е. *закон Ома* для переменного тока:

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (2.62)$$

Сдвиг фаз  $\varphi$  между током и напряжением находится из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Итак, для электрической цепи, изображенной на рис. 42, получаем:

$$I = I_0 \sin \omega t; \quad (2.63)$$

$$U = U_0 \sin(\omega t + \varphi).$$

Отметим, что для описания переменного тока обычно используют три характеристики тока: мгновенное значение тока ( $I$  в выражении 2.63), амплитудное ( $I_0$ ) и *эффективное* (или *действующее*) значение.

*Эффективным значением силы переменного тока* называют силу такого постоянного тока, который выделяет в проводнике такое же количество теплоты, что и переменный ток за время, равное периоду  $T$  его колебаний (или за кратное число периодов  $T$ ). Значение  $I_{\text{эф}}$  достаточно просто связано с  $I_0$ :

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.64)$$

Аналогично

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.65)$$



Средняя мощность переменного тока за период равна

$$P = I_{\text{эф}} U_{\text{эф}} \cos \varphi. \quad (2.66)$$

Здесь  $\cos \varphi$  называется *коэффициентом мощности*. В технике его стремятся сделать ближе к единице, что легко осуществить, вводя в цепь дополнительные емкости или индуктивности.

## 2.35. Основные положения теории Максвелла

Между электрическим и магнитным полем существует глубокая связь. Эта связь была детально изучена Максвеллом, в результате чего он записал свои знаменитые уравнения электромагнитного поля. Максвелл базировался на двух основных положениях.

I. Согласно закону Фарадея в неподвижном замкнутом проводящем контуре  $L$ , находящемся в переменном магнитном поле возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}.$$

Операции дифференцирования по времени и интегрирования по поверхности здесь можно поменять местами, потому что и контур, и поверхность неподвижны. Учтено также, что вектор  $\mathbf{B}$  зависит, вообще говоря, и от времени, и от координат, поэтому под знаком интеграла записан символ частной производной по времени  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ .

При этом ЭДС можно выразить через напряженность сторонних сил:

$$\varepsilon_i = \oint_L \mathbf{E}_{\text{ст}} d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}.$$

Отсюда Максвелл и предположил, что всякое изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле.

Напряженность сторонних сил в законе Фарадея есть напряженность электрического поля,  $E_{\text{ст}} = E$ :

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}. \quad (2.67)$$

Это математическое выражение первой гипотезы Максвелла является *первым фундаментальным уравнением теории Максвелла*.

В левой части уравнения Максвелла записана циркуляция напряженности электрического поля по замкнутому контуру. В *электростатическом* поле такая циркуляция всегда равна нулю. Произвольное же *электрическое* поле оказывается *непотенциальным*.

Отметим, что если имеется переменное магнитное поле, а заряды отсутствуют, то все линии напряженности электрического поля замкнутые. Такое поле называется вихревым.

II. Второе положение теории Максвелла. В электрических цепях постоянного тока линии тока непрерывны. При наличии в цепи конденсатора постоянный ток течь не может (электрическая цепь оказывается разомкнутой), а переменный ток может течь и в такой цепи. В этом случае линии тока обрываются на обкладках конденсатора, так как через конденсатор ток не течет. Но Максвелл предположил, что переменный ток *создает в пространстве такое же магнитное поле, как если бы линии тока не прерывались на конденсаторе*. Мы знаем, что на самом деле в конденсаторе тока нет. Так чем же создается это магнитное поле? *В конденсаторе есть переменное электрическое поле (величина заряда на обкладках меняется), которое и порождает магнитное поле*. В этом и заключается суть второй гипотезы Максвелла.

Сопоставим, чисто формально, переменному электрическому полю такой ток, который породил бы то же магнитное поле, какое порождается рассматриваемым переменным электрическим полем. Этот «ток» называется *током смещения*, в отличие от обычного тока движущихся зарядов, который будем называть *током проводимости*.

Теперь плотность  $\mathbf{j}$  полного тока в каждой точке пространства

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{пр}} + \mathbf{j}_{\text{см}}.$$

Можно показать, что плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения  $\mathbf{D}$ :

$$\mathbf{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

(Напомним, что в соответствии с выражением (2.38)  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$ .)

С учетом тока смещения *второе уравнение теории Максвелла* записывается следующим образом:

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{j}_{\text{пр}} d\mathbf{S} + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{S}. \quad (2.68)$$

По существу это обобщенная теорема о циркуляции  $\mathbf{H}$ , справедливая в общем случае произвольно меняющихся во времени токов и полей.

В систему уравнений Максвелла входят и две теоремы Гаусса о потоках векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$ , которые остаются справедливыми и в общем случае переменных полей:

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV; \quad (2.69)$$

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0. \quad (2.70)$$

Совокупность этих четырех уравнений Максвелла в интегральной форме (2.67) — (2.70) описывает все классические (т.е. некантовые) электромагнитные явления. Уравнения Максвелла выявляют неразрывную связь между электрическим и магнитным полями, которые, изменяясь, взаимно порождают друг друга и, следовательно, не являются независимыми полями. В природе существует единое *электромагнитное поле*.

Для статических полей  $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$ , и уравнения Максвелла

переходят в обычные уравнения электростатического и постоянного магнитного полей.

## 2.36. Электромагнитные волны

Существование электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла. Переменное электрическое поле порождает магнитное и наоборот. Поэтому если возбудить с помощью колеблющихся зарядов переменное электромагнитное поле, то в окружающем пространстве возникнет последовательность взаимных превращений электрического и магнитного полей, распространяющихся от точки к точке. Это и будет электромагнитная волна.

Можно показать, что в однородной диэлектрической среде ( $\epsilon = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ ) при отсутствии зарядов и токов ( $\rho = 0$ ,  $\mathbf{j} = 0$ ) уравнения Максвелла приводят к следующим волновым уравнениям для векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} &= 0; \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned}$$

Решением этих уравнений является плоская электромагнитная волна (фронт волны — плоскость), распространяющаяся в направлении оси  $X$  со скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}}.$$

В вакууме  $\epsilon = \mu = 1$  и скорость электромагнитной волны

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (2.71)$$

Отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде называется абсолютным показателем преломления среды  $n$ :

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} = n. \quad (2.72)$$

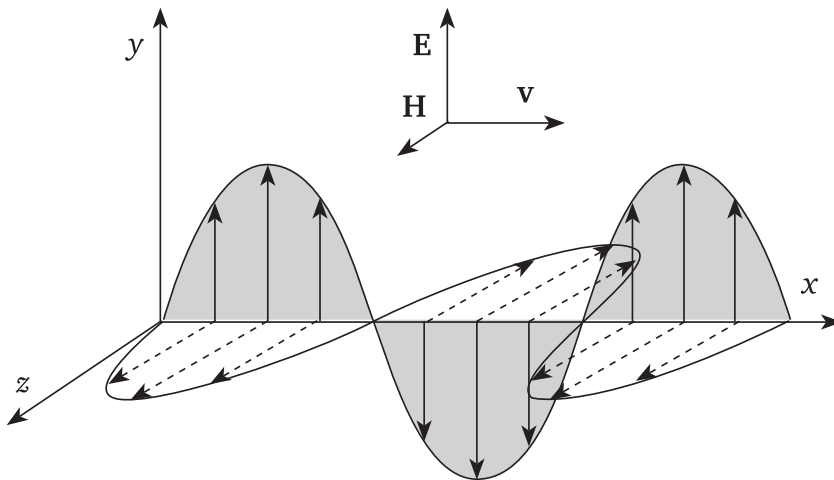


Рис. 44

На рис. 44 показана как бы мгновенная фотография плоской электромагнитной волны. Видим, что векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  перпендикулярны друг другу и к направлению распространения волны, т.е. электромагнитные волны являются поперечными волнами. Это общее свойство всех электромагнитных волн.

То, что векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  при распространении волны остаются в своих плоскостях означает, что волна является поляризованной.

Взаимодействие электромагнитных волн с веществом определяется длиной волны. Например, тело может быть непрозрачно для световых волн и прозрачно для рентгеновских.

## Контрольные вопросы и задания

1. Что такое Вселенная и когда она возникла?
2. Чем Метагалактика отличается от галактики?
3. Приведите пример спиральной галактики.
4. Что такое звезды?
5. Что вы знаете о Солнце?
6. Много ли фундаментальных взаимодействий в природе? Каковы их основные особенности?
7. Каковы границы применимости классической (ньютоновской) механики?
8. Сформулируйте три закона Ньютона.
9. Что такое инерциальные системы отсчета? Является ли система отсчета, связанная с Землей, инерциальной?
10. Какой закон сохранения обусловлен однородностью времени? Сформулируйте его.
11. Какой закон сохранения обусловлен однородностью пространства? Сформулируйте его.
12. Какой закон сохранения обусловлен изотропией пространства? Сформулируйте его.
13. Что такое преобразования Галилея и принцип относительности Галилея?

14. Что называется моментом инерции твердого тела относительно данной оси?
15. Какие колебания называются гармоническими?
16. Что такое звук?
17. Чем определяется тембр звука?
18. Какой звук называется шумом?
19. Поясните закон Кулона.
20. Определите две основные характеристики электрического поля: векторную  $\mathbf{E}$  и скалярную  $\varphi$  (напряженность и потенциал).
21. Что такое теорема Гаусса.
22. Что такое вектор поляризации  $\mathbf{P}$  и вектор электрического смещения  $\mathbf{D}$ ?
23. Поясните закон Ома и закон Джоуля — Ленца.
24. Что собой представляют основные законы магнетизма: закон Био — Савара — Лапласа и закон Ампера?
25. Опишите явление электромагнитной индукции и поясните закон Фарадея.
26. Какие вещества называют диамагнетиками, парамагнетиками и ферромагнетиками?
27. Приведите наиболее характерные особенности магнитного поля Земли.
28. Что такое эффективное значение переменного тока?
29. В чем суть двух основных положений теории Максвелла?
30. Описывают ли четыре уравнения Максвелла все классические электромагнитные явления?
31. Вытекает ли существование электромагнитных волн и их основные характеристики из уравнений Максвелла?

# Глава 3

## ФИЗИКА XX ВЕКА

### 3.1. Элементы специальной теории относительности

*Специальная теория относительности (СТО) создана А. Эйнштейном в 1905 г. В 1916 г. А. Эйнштейн создал и общую теорию относительности (ОТО), представляющую собой классическую (неквантовую) релятивистскую теорию гравитации. Ознакомление с ОТО выходит за рамки данного курса, и далее пойдет речь только об основах СТО.*

В основе СТО лежат два постулата (постулат — утверждение, принимаемое за истинное, хотя и строго не доказанное).

I. *Принцип относительности Эйнштейна.* В принципе относительности Галилея говорится об одинаковости законов механики для всех инерциальных систем отсчета. А. Эйнштейн распространил этот принцип вообще для всех законов природы: *все законы природы одинаково формулируются для всех инерциальных систем отсчета.*

Эйнштейн показал, что при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую нужно пользоваться не преобразованиями Галилея, а более общими преобразованиями Лоренца:

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + \left(\frac{v}{c^2}\right)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\beta = \frac{v}{c}$ .

Поэтому принцип относительности Эйнштейна можно формулировать и так: *уравнения, выражающие законы природы, инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца.*

II. *Принцип постоянства скорости света.* Скорость света в вакууме не зависит от движения источников света и, следовательно, одинакова во всех инерциальных системах отсчета.



Это утверждение опирается на все имеющиеся эксперименты по определению скорости света при различных условиях и прежде всего на опыты А. Майкельсона.

Отметим, что скорость света в вакууме является предельной скоростью распространения взаимодействий в природе. Если над этим поразмыслить, то можно прийти к важному выводу: *понятие одновременности*, считавшееся в ньютоновской механике абсолютным, в действительности является *относительным*.

Посмотрим, как это получается.

Пусть из середины равномерно движущегося поезда испускается в обоих направлениях световой сигнал (рис. 45).

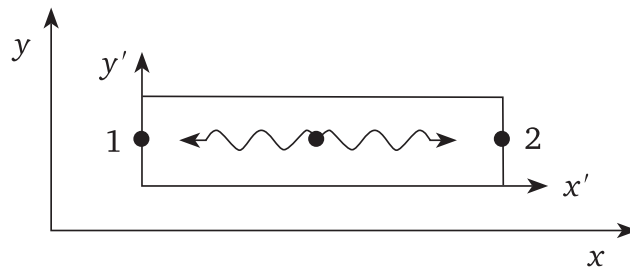


Рис. 45

Едущий в поезде пассажир увидит, что сигнал достиг головы и хвоста поезда одновременно. Дежурный на станции отметит, что сигнал достиг хвоста поезда раньше, чем головы, так как точка 1 движется навстречу сигналу, а точку 2 свету нужно догонять.

В результате имеем, что *время в разных системах отсчета течет неодинаково*. Но самое главное, пространство и время оказываются *взаимосвязанными*, образуя *единое четырехмерное пространство-время*.

Что это означает? Это означает, что любое событие в точке (например, распад ядра атома) в теории относительности всегда характеризуется четырьмя величинами: координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и временем события  $t$ . Значения этих четырех величин зависят от системы отсчета.

В разговоре об одновременности событий важно подчеркнуть следующее. *Если между событиями имеется причинная связь, то событие-причина во всех системах отсчета предшествует событию-следствию*. Рождение элементарной частицы во всех системах отсчета происходит раньше ее распада.

Количественно интервал времени между двумя событиями в одной точке пространства при переходе из одной инерциальной системы в другую изменяется следующим образом. Обозначим  $\tau_0$  время между событиями (например, рождением частицы и ее распадом) в неподвижной системе отсчета, а буквой  $\tau$  — время между теми же событиями в системе отсчета, движущейся со скоростью  $v$  относительно первой системы. Тогда

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (3.2)$$

Поскольку  $\tau > \tau_0$ , имеем, что в движущихся системах время течет медленнее. Если  $v \ll c$ , то этим, как говорят, релятивистским эффектом замедления времени можно пренебречь. И другие релятивистские эффекты проявляются заметным образом лишь при скоростях движения, близких к скорости света  $c$ .

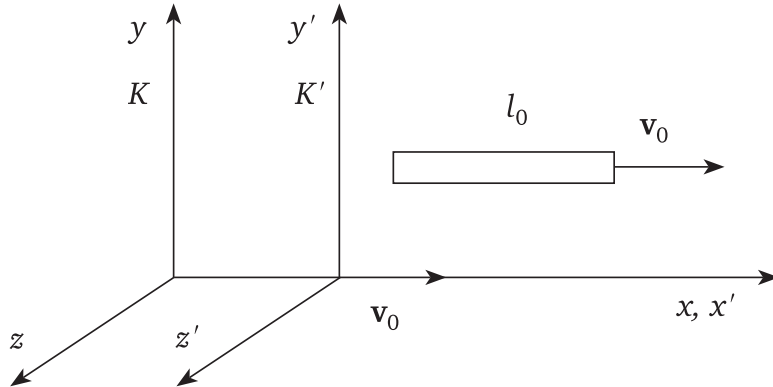


Рис. 46

Относительно не только время, но и расстояния. На рис. 46 стержень длины  $l'_0 = x'_2 - x'_1$ , неподвижный относительно «штриховой» системы отсчета  $K'$ , движется вдоль оси  $x$  со скоростью  $v_0$ . Длина стержня  $l$  в неподвижной системе отсчета  $K$  равна

$$I = I_0 \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (3.3)$$

Длина стержня  $l_0 = x_2 - x_1$  стремится к нулю при приближении скорости его движения  $v$  к скорости света  $c$ .

В случае движения более сложного трехмерного тела (стержень является примером простейшего одномерного тела), например шара, его поперечные размеры не изменяются. В результате шар сплющивается в направлении движения и принимает форму эллипсоида. Интересно, что зрительно этот эллипсоид будет казаться шаром, потому что время, за которое свет проходит расстояние от различно удаленных точек тела до глаза неодинаково.

В теории относительности изменяется и формула сложения скоростей по сравнению с привычной ньютоновской механикой. Пусть частица движется вдоль осей  $x$  и  $x'$  в направлении скорости  $v_0$  движущейся системы отсчета. Пусть  $v$  — скорость в системе  $K$ ,  $v'$  — скорость в системе  $K'$ . Тогда

$$v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v_0 v'}{c^2}}. \quad (3.4)$$

С помощью соотношения (3.4) можно проверить, действительно ли скорость одинакова в различных системах отсчета. Пусть скорость

в движущейся системе  $v' = c$ . Тогда скорость движения в неподвижной системе отсчета

$$v = \frac{c + v_0}{1 + \frac{v_0 c}{c^2}} = c.$$

Получается, что действительно скорость света в обеих выбранных системах отсчета равна  $c$ .

Выражение для импульса частицы в теории относительности имеет вид

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (3.5)$$

Основное уравнение релятивистской динамики материальной точки (второй закон Ньютона):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) = \mathbf{F}. \quad (3.6)$$

Отсюда видно, что масса частицы при высоких скоростях движения уже не является коэффициентом пропорциональности между силой и ускорением. Более того, сила  $\mathbf{F}$  в релятивистской механике не является инвариантной, т.е. в различных инерциальных системах отсчета она имеет различную величину и направление. Ускорение  $\mathbf{a}$  и сила  $\mathbf{F}$  в общем случае оказываются неколлинеарными. Это значит, что, вообще говоря, направление ускорения не совпадает с направлением силы.

Особо отметим полученное Эйнштейном выражение для полной энергии свободной частицы, движущейся со скоростью  $v$ :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (3.7)$$

Свободной называют частицу, на которую не действуют никакие силы.

Неподвижная частица обладает энергией

$$E_0 = mc^2. \quad (3.8)$$

Энергия  $E_0$  называется *энергией покоя* и представляет собой внутреннюю энергию частицы. Таким образом, в теории относительности полной энергией частицы называют сумму ее кинетической энергии и энергии покоя.

Суммарная масса взаимодействующих частиц может не сохраняться. Например, при встрече электрона и позитрона (позитрон — элементарная частица с массой электрона, но с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона) они *аннигилируют*, т.е. исчезают. При этом вся масса покоя позитрона и электрона переходит в энергию образовавшихся  $\gamma$ -фотонов в строгом соответствии с формулой (3.8). Масса покоя  $\gamma$ -фотонов равна нулю, и они могут существовать только при движении со скоростью света  $c$ .

Возможен и обратный процесс «появления массы из ничего», когда при соответствующих условиях  $\gamma$ -фотон с достаточной энергией может превратиться в пару электрон + позитрон, причем всегда рождается именно пара этих частиц в соответствии с законом сохранения электрического заряда.

### 3.2. Строение атома

До 1911 г. правильных представлений о строении атома не существовало. В 1903 г. английский физик Д. Д. Томсон предложил модель, согласно которой положительный заряд атома распределен по всему объему атома, и внутри этого объема, как *изюминки в булке*, разбросаны электроны. Суммарный заряд электронов равен положительному заряду, так что в целом атом электронейтрален.

Однако серьезного экспериментального обоснования модель Томсона не имела. В 1911 г. другой английский физик Э. Резерфорд провел знаменитые и красивые исследования распределения положительного заряда в атоме, завершившиеся созданием ядерной модели атома. Резерфорд изучал рассеяние  $\alpha$ -частиц (альфа-частицы — ядра атомов гелия) при прохождении через тонкую металлическую фольгу. Выяснилось, что некоторые  $\alpha$ -частицы рассеиваются на очень большие углы, близкие к  $180^\circ$ . Это возможно, если внутри атома есть сильное электрическое поле, созданное положительным зарядом, связанным с большой массой и сосредоточенным в очень малом объеме. Поэтому Резерфорд и *предложил ядерную модель атома*: в центре атома находится тяжелое положительное ядро размером порядка  $10^{-12}$  см, в котором сосредоточена почти вся масса атома (размер атома порядка  $10^{-8}$  см), а вокруг ядра расположены электроны. Число электронов атома равно порядковому номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.

На основе ядерной модели Резерфорд вывел формулу для распределения рассеянных  $\alpha$ -частиц в зависимости от угла рассеяния. В 1913 г. она была проверена экспериментально и получила полное подтверждение.

Особо стоит вопрос о движении электронов в атоме. Поскольку система неподвижных электрических зарядов не может находиться в устойчивом равновесии, Резерфорду пришлось предположить, что электроны вращаются вокруг ядра, примерно как планеты вокруг

Солнца. Но в соответствии с законами классической электродинамики двигающийся с ускорением электрон должен непрерывно излучать электромагнитные волны и в конце концов упасть на ядро. Этого не происходит, следовательно, можно резюмировать, что к внутриатомным явлениям законы классической физики неприменимы.

Пытаясь разрешить проблему с движением электронов атома Н. Бор в 1913 г. высказал два постулата:

1) электроны в атоме могут двигаться не по любым орбитам, а только по некоторым, удовлетворяющим определенным квантовым условиям. Двигаясь по одной из таких орбит, электрон не излучает электромагнитных волн;

2) излучение испускается или поглощается в виде кванта энергии  $\hbar\omega$  при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое:

$$\hbar\omega = E_n - E_m, \quad (3.9)$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка;  $n$  и  $m$  — номера состояний,

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (3.10)$$

*Многочисленные эксперименты подтверждают существование дискретных энергетических уровней атома.*

Разработанная Бором теория атома водорода оказалась весьма удачной: предсказываемые теорией частоты спектральных линий водородного атома хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако попытка построить на основе постулатов Бора теорию атома гелия успеха не имела. Причина — внутренняя противоречивость теории Бора. Правильно отмечая неприменимость классической физики к микромиру, она уже не являлась последовательно классической теорией и в то же время она не являлась и последовательно квантовой теорией, которая, как было показано в дальнейшем, прекрасно описывает физику микромира.

### 3.3. Гипотеза де Бройля

В 1924 г. французский физик Л. де Бройль выдвинул гипотезу, что не только явные волны (как, например, свет) обладают свойствами частиц (что в случае света проявляется, например, в явлении фотоэффекта), но верно и обратное утверждение: *явные частицы обладают свойствами волн*. Таким образом, де Бройль предложил, что корпускулярно-волновой дуализм является универсальным свойством материи. Но что особенно важно, де Бройль не просто высказал предположение, но и предложил формулу для расчета длины волны движущейся частицы. Идея получения формулы такова. Квант света (называемый обычно фотоном) обладает энергией

$$E = \hbar\omega$$

и импульсом  $p = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$ .

Де Бройль предположил, что эти же соотношения можно использовать и для определения волновых свойств частиц:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}; \quad (3.11)$$

$$\omega = \frac{E}{\hbar}. \quad (3.12)$$

Для ньютоновской механики, т.е. для частиц с малыми скоростями

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv}.$$

*Гипотеза де Бройля достаточно быстро (уже в 1927 г.) была подтверждена серией блестящих экспериментов. В частности, Дж. П. Томсон и П. С. Тартаковский получили дифракционную картину при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу. Дифракционная картина оказалась точно такой же, что и при прохождении рентгеновских лучей с соответствующей длиной волны, определяемой соотношением де Бройля (3.11).*

### 3.4. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

В 1927 г. В. Гейзенберг установил очень важное соотношение, отражающее *своеобразие свойств микрочастиц*. Оказывается, любая микрочастица, например электрон, не может иметь одновременно *точных* значений координаты  $x$  и соответствующей компоненты импульса  $p_x$ . Неопределенности значений  $x$  и  $p_x$  удовлетворяют соотношению

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (3.13)$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка.

В принципе возможно такое состояние, когда одна из переменных имеет точное значение, но при этом другая переменная оказывается совершенно неопределенной (говорят, что ее неопределенность в этом случае равна бесконечности).

Естественно, что аналогичные соотношения имеют место и по другим осям —  $y$  и  $z$ .

*Из соотношений неопределенности Гейзенберга однозначно следует вывод о неприменимости понятия траектории к микрочастицам.*



Действительно, если точно известно, где находится частица в определенный момент времени, то совершенно невозможно сказать, где она будет в следующий момент, так как совсем неизвестен ее импульс.

### 3.5. Уравнение Шредингера. Волновая функция

Идея де Бройля имела большое значение для создания квантовой механики. Уже в 1926 г. австрийский физик Э. Шредингер получил основное уравнение нерелятивистской квантовой механики:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}, \quad (3.14)$$

где  $m$  — масса частицы;  $i$  — мнимая единица;  $U$  — потенциальная энергия частицы;  $\Delta$  — оператор Лапласа, результат действия которого на некоторую функцию равен сумме вторых частных производных по координатам:

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}.$$

Функция  $\psi$  называется *волновой функцией* (или пси-функцией).

Уравнение Шредингера позволяет найти волновые функции частиц, движущихся в различных силовых полях. Эти поля входят в уравнение Шредингера через вид функции  $U$  потенциальной энергии частицы.

Зачем нам нужно решать уравнение Шредингера и искать волновую функцию  $\psi$ ? Все дело в физическом смысле волновой функции: *квадрат модуля волновой функции определяет вероятность  $dP$  обнаружения частицы в пределах объема  $dV$ :*

$$dP = |\psi|^2 dV. \quad (3.15)$$

Интеграл по всему пространству от выражения (3.15) дает вероятность обнаружения частицы в одной из точек пространства, т.е. вероятность достоверного события, которая равна единице:

$$\int |\psi|^2 dV = 1. \quad (3.16)$$

Соотношение (3.16) называют *условием нормировки*, а функции, удовлетворяющие этому условию, называют *нормированными*.

Из выражения (3.15) видим, что квадрат модуля волновой функции дает *плотность вероятности* нахождения частицы в данном месте пространства (вероятность, отнесенная к единице объема).

Из физического смысла волновой функции следует, что квантовая механика не позволяет определить местонахождение частицы в про-

странстве или траекторию движения частицы. Квантовая механика с помощью волновой функции позволяет лишь предсказать, с какой вероятностью частица может оказаться в различных точках пространства. Таким образом, квантовая механика имеет статистический характер.

Следует отметить, что уравнение Шредингера не может быть получено из каких-то других соотношений. Оно является *основным предположением*, справедливость которого доказывается совпадением всех его следствий с опытными фактами.

Если силовое поле, в котором движется частица, *стационарно* (т.е. постоянно во времени), то уравнение Шредингера приобретает более простой вид

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0, \quad (3.17)$$

где  $E$  — полная энергия частицы (для стационарного поля она постоянна).

Далее мы будем иметь дело с уравнением Шредингера только в виде (3.17).

### 3.6. Квантование энергии

Из теории дифференциальных уравнений известно, что уравнения вида (3.17) имеют решения не при любых значениях  $E$ , а лишь при некоторых избранных значениях, которые называются *собственными значениями энергии*. Решения, соответствующие собственным значениям энергии, называются *собственными функциями задачи*.

Нахождение собственных значений энергии и собственных функций задачи часто бывает очень трудным с математической точки зрения. Для иллюстрации мы рассмотрим простой пример движения частицы в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме. Это означает, что частица может двигаться только вдоль одного направления, например, вдоль оси  $x$ , и ее движение ограничено непроницаемыми для частицы стенками при  $x = 0$  и  $x = l$ , как показано на рис. 47. Потенциальная энергия  $U$  здесь равна нулю при  $0 \leq x \leq l$  и обращается в бесконечность при  $x < 0$  и  $x > l$ . За пределы такой потенциальной ямы частица попасть не может.

Решение уравнения Шредингера позволяет найти следующие выражения для собственных значений энергии частицы  $E_n$  и собственных функций задачи  $\Psi_n(x)$ :

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots); \quad (3.18)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (n=1, 2, 3, \dots). \quad (3.19)$$

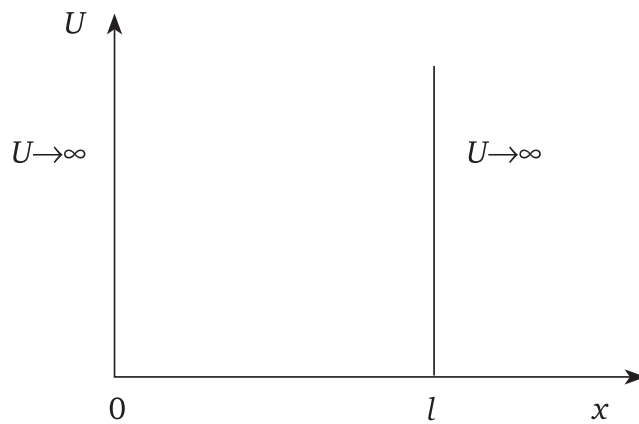


Рис. 47

Спектр энергии получается дискретным, т.е. частица может иметь энергии, равные  $E_n$ , и не может иметь других значений энергии. Интересно, что минимальное значение энергии частицы  $E_1 \neq 0$ . На рис. 48 приведена схема энергетических уровней частицы, а на рис. 49 показаны соответствующие собственные функции.

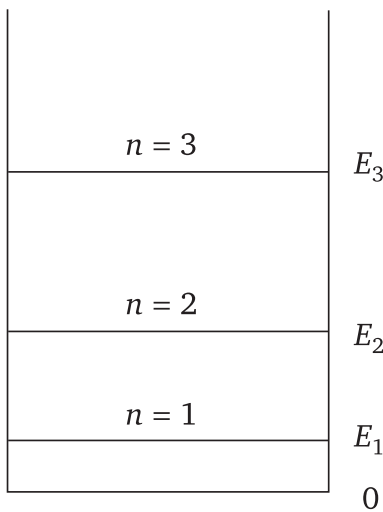


Рис. 48

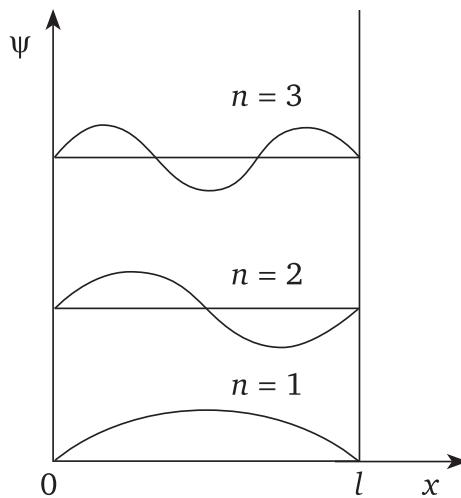


Рис. 49

На рис. 50 представлена плотность вероятности нахождения частицы на различных расстояниях от стенок ямы.

Из графиков на рис. 50 следует необычный с точки зрения классической физики результат: частица в состоянии с  $n = 2$  не может быть обнаружена в середине ямы! А частица в состоянии с  $n = 3$  имеет нулевую вероятность нахождения при  $x = \frac{1}{3}l$  и  $x = \frac{2}{3}l$ . В соответствии же

с классическими представлениями все положения частицы в яме равновероятны.

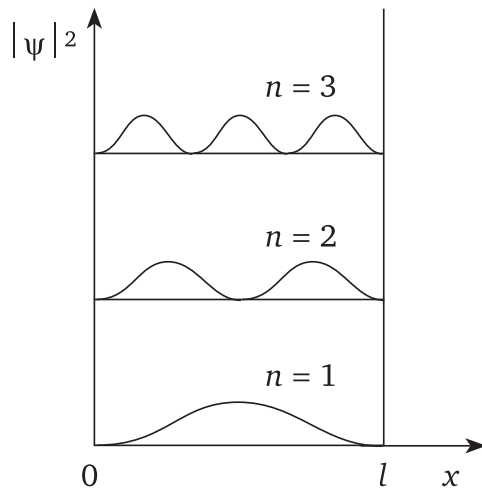


Рис. 50

### 3.7. Вынужденное излучение

В стационарном состоянии атома электроны располагаются на самых низких энергетических уровнях, но не все на одном, а в соответствии с *принципом Паули*: в одном и том же атоме не может быть двух электронов, обладающих одинаковой совокупностью четырех квантовых чисел —  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  и  $m_s$ . Эти квантовые числа описывают состояние электрона в атоме и называются следующим образом:

- $n$  — главное квантовое число ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );
- $l$  — азимутальное квантовое число ( $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ );
- $m_l$  — магнитное квантовое число ( $m_l = 0, \pm 1, \dots, \pm l$ );
- $m_s$  — спиновое квантовое число ( $m_s = +1/2, -1/2$ ).

Энергия состояния зависит, в основном, от чисел  $n$  и  $l$ , но есть небольшая зависимость и от чисел  $m_l$  и  $m_s$ , поскольку их значения зависят от взаимной ориентации орбитальных и спиновых моментов.

Электроны в атоме могут переходить с одного уровня на другой, причем как с более высокого энергетического уровня на низкий, так и в обратном направлении. Однако переход с низкого уровня на более высокий возможен только при поглощении энергии атомом, например, энергии падающего электромагнитного излучения (в частности, кванта света), а переход с более высокого уровня на низкий происходит самопроизвольно (как говорят, *спонтанно*). Вероятность спонтанного перехода определяется внутренними свойствами атомов.

Однако в 1916 г. Эйнштейн указал, что кроме данных двух типов переходов есть еще и третий вид — *испускательные переходы, вызываемые падающим на вещество излучением*. Это и есть *вынужденное, или индуцированное* излучение, которое обладает очень интересными свойствами:

1) направление его распространения в точности совпадает с направлением вынуждающего излучения;

2) частота, фаза и поляризация вынужденного и вынуждающего излучения полностью совпадают.

Следовательно, вынужденное и вынуждающее излучения оказываются строго когерентными, что и используется в работе лазеров.

### 3.8. Принцип действия лазера

Вынужденное излучение можно использовать для усиления электромагнитных волн, что осуществляется в исключительно полезных устройствах, называемых *лазерами*. Происхождение слова «лазер» идет от первых букв английского названия данного прибора: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* — усиление света с помощью вынужденного излучения. Однако следует отметить, что впервые вынужденное излучение было использовано в *мазерах*, разработанных в 1953 г. российскими физиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и независимо от них американским физиком Ч. Х. Таунсом. За это крупнейшее открытие в 1964 г. все трое стали Нобелевскими лауреатами. Мазеры (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* — усиление микроволн с помощью вынужденного излучения) отличаются от лазеров диапазоном электромагнитного излучения и работают в невидимом человеческим глазом диапазоне сантиметровых волн.

Первый лазер был создан американским ученым Т. Г. Мейманом в 1960 г. Из-за работы в оптическом диапазоне лазеры называют еще *оптическими квантовыми генераторами*.

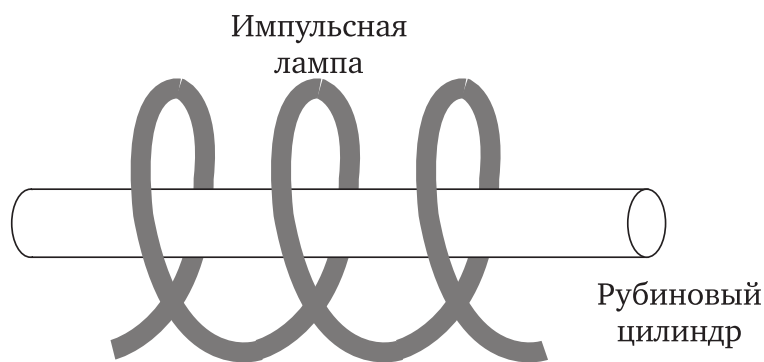


Рис. 51

Чтобы получить усиление падающей волны необходимо сначала получить *инверсную населенность* уровней, т.е. чтобы в состоянии с большей энергией было бы больше электронов, чем в состоянии с меньшей энергией. В первом лазере Меймана рабочим телом был цилиндр из розового рубина. Рубин — это оксид алюминия  $Al_2O_3$ , в которой часть атомов алюминия замещена атомами хрома. Рубиновый цилиндр освещается импульсной ксеноновой лампой с широкой полосой частот электромагнитного излучения (рис. 51).

Ионы хрома  $Cr^{3+}$  поглощают свет и переходят в возбужденное состояние. Как известно, в возбужденном состоянии атомы или ионы

не могут находиться долго и обязательно перейдут в основное состояние. В лазере рабочее тело выбрано таким, чтобы переход в основное состояние проходил в два этапа.

Рассмотрим схему энергетических уровней иона хрома (рис. 52). При поглощении света ионы переходят из основного состояния 1 в возбужденное состояние 3. Время жизни уровня 3 порядка  $10^{-8}$  с. За это время часть ионов хрома спонтанно перейдет в состояние 1, но вероятность перехода в состояние 2 значительно больше, поэтому большинство ионов перейдет из состояния 3 в состояние 2. Уровень 2 существенно отличается от уровня 3 по времени жизни (примерно в 100 000 раз): время жизни уровня 2 порядка  $10^{-3}$  с, поэтому данный уровень называют *метастабильным*. В результате удастся перевести в состояние 2 больше ионов, чем находится в состоянии 1, т.е. получается создать инверсную населенность уровней 1 и 2.

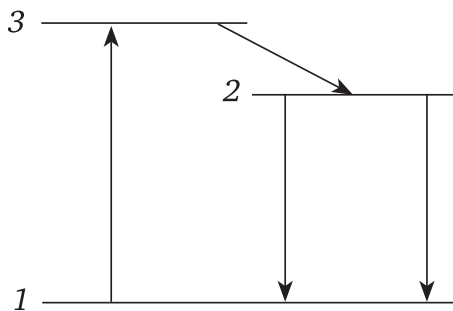


Рис. 52

Далее происходит следующее. Рано или поздно какой-то ион хрома спонтанно перейдет из состояния 2 в основное состояние 1. При этом излучается фотон, который, пролетая вблизи других ионов хрома, вызывает вынужденное излучение, носящее лавинообразный характер. Для формирования строго направленного пучка лазерного излучения торцы рубинового цилиндра хорошо полируют, делают их строго параллельными и покрывают слоем серебра, чтобы создать зеркальную поверхность. Причем один торец покрывается толстым непрозрачным слоем серебра, а другой торец покрывается таким слоем, чтобы пропускать около 8% упавшей на него энергии. Такая конструкция позволяет создать условия для преимущественного каскадного развития вынужденного излучения вдоль оси рубинового цилиндра, потому что фотоны, летящие в других направлениях, просто выходят из кристалла через его боковую поверхность на самых ранних стадиях образования лавины.

Разумеется, в настоящее время не все лазеры работают на рубине. Например, в 1961 г. А. Джаваном создан газовый лазер, работающий на смеси гелия и неона. Некоторые лазеры работают в импульсном режиме, другие — в непрерывном. Но для излучения всех лазеров характерны строгая монохроматичность ( $\Delta\lambda \sim 0,1 \text{ \AA}$ ), высокая степень когерентности, большая интенсивность и узость пучка. *Фокусируя лазерное излучение с помощью линзы, можно получить поток энергии, в 1000 раз*



превышающий плотность потока энергии, достигаемую фокусировкой солнечного света.

### 3.9. Состав атомного ядра

До 1932 г. состав атомного ядра науке был неизвестен. До этого момента были известны только две элементарные частицы — электрон и протон. Третья важная частица — нейтрон — была открыта английским физиком Д. Чедвиком в 1932 г. В этом же году *русским физиком Д. Д. Иваненко впервые предложена протонно-нейтронная модель атомного ядра*, что было сразу же поддержано и развито В. Гейзенбергом. Сейчас эта модель является общепризнанной.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые называют еще и нуклонами. Число протонов в ядре равно атомному номеру элемента  $Z$  в периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Сумму числа протонов  $Z$  и числа нейтронов  $N$  в ядре называют *массовым числом  $A$* :

$$A = Z + N.$$

Протон обладает зарядом  $+e$ , т.е. положительным зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона:

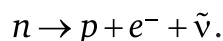
$$m_p = 1836m_e.$$

Электрический заряд нейтрона равен нулю. Масса нейтрона больше массы протона:

$$m_n = 1838,6m_e.$$

Ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными массовыми числами  $A$  называют *изотопами*. Большинство элементов таблицы Менделеева имеет по несколько стабильных изотопов.

Нейтрон в свободном состоянии нестабилен — с периодом полураспада около 12 мин он самопроизвольно распадается, превращаясь в протон и испуская электрон и элементарную частицу, называемую *антинейтрино* ( $\bar{\nu}$ ). Схему распада нейтрона можно записать так:



Важно отметить, что несмотря на отсутствие электрического заряда нейтрон обладает магнитными свойствами, характеризующимися величиной собственного магнитного момента. Магнитными моментами обладают все три основные элементарные частицы: протон, нейтрон и электрон.

### 3.10. Энергия связи ядра атома

Масса покоя любого ядра  $m_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс покоя входящих в него нуклонов:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n. \quad (3.9)$$

Соотношение (3.9) отражает тот факт, что при объединении нуклонов в ядро происходит выделение энергии, которая и называется *энергией связи ядра*, так как именно столько энергии необходимо будет сообщить ядру, чтобы вновь его разъединить на нуклоны. Иначе разложить ядро на нуклоны невозможно, потому что любой нуклон может существовать только со своей определенной массой и без сообщения энергии ему будет не хватать массы ( $E = mc^2$ ), что и будет препятствием к разделению ядра.

Величина энергии связи ядра очень велика. Например, образование 2 г гелия приводит к выделению такой же энергии, что и при сгорании вагона каменного угля.

Если поделить энергию связи всего ядра  $E_{\text{св}}$  на число нуклонов в ядре  $A$ , то получим *удельную энергию связи* нуклона в ядре. Она известна для всей таблицы Менделеева и представлена на рис. 53.

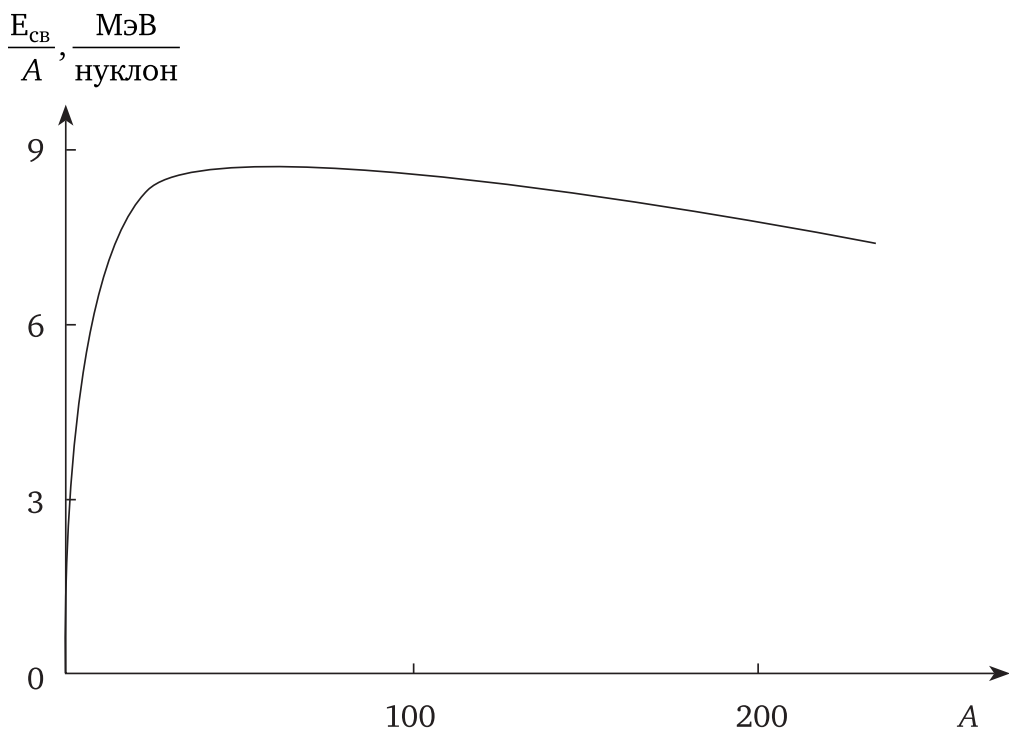


Рис. 53

Максимальной энергией связи обладают ядра с массовыми числами  $A_{\text{max}} = 50\text{—}60$ . Здесь энергия связи достигает 8,7 МэВ/нуклон. Затем с ростом  $A$  удельная энергия связи плавно уменьшается и для самого тяжелого природного элемента урана составляет 7,5 МэВ/нуклон. Два характерных спада на кривой зависимости удельной энергии связи

от массового числа  $A$  (относительно крутой спад при уменьшении  $A$  и более пологий спад при увеличении  $A$  по сравнению с  $A_{\max}$ ) делают возможным осуществление двух энергетически выгодных процессов: *деления* тяжелых ядер на более легкие и *синтеза* (или слияния) легких ядер в более тяжелое.

### 3.11. Деление ядер

Деление тяжелых ядер может быть как самопроизвольным, так и вынужденным. Например, в 1940 г. советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак обнаружили процесс самопроизвольного деления ядер урана на две приблизительно равные части. Затем это наблюдалось и для многих других ядер. Но по своей физической основе спонтанное деление близко к вынужденному делению, что мы и рассмотрим подробнее.

Деление наиболее интересного для нас (как показала практика) ядра урана-235 после захвата им одного нейтрона может реализовываться в разных вариантах. Ядра делятся на две части таким образом, что среди продуктов распада обнаруживается около 80 различных осколков, но наиболее вероятным является деление на такие осколки, массы которых относятся как 2 : 3. Кроме двух осколков при делении ядра урана выделяется, в среднем, 2,5 свободных нейтрона. Эти нейтроны обладают высокой энергией порядка 2 МэВ и называются быстрыми, поскольку такой энергии соответствуют скорости порядка  $2 \cdot 10^7$  м/с. В среднем каждый акт деления приводит к выделению около 200 МэВ ядерной энергии, которая преобразуется в основном в кинетическую энергию осколков деления.

Отмеченные особенности процесса деления урана дают возможность двоякого использования ядерной энергии: осуществления управляемой реакции деления в ядерном реакторе и цепной реакции в атомной бомбе.

*Первый ядерный уран-графитовый реактор был введен в работу в Чикагском университете в 1942 г. под руководством итальянского физика Э. Ферми. У нас подобный реактор заработал в 1946 г. в Москве под руководством И. В. Курчатова. Простейшая схема активной зоны уран-графитового реактора приведена на рис. 54.*

В качестве делящегося вещества используется природный уран, который иногда немного обогащается изотопом  $U^{235}$ . Отметим, что природный уран содержит 99,27% изотопа  $U^{238}$ , 0,72%  $U^{235}$  и около 0,01%  $U^{234}$ .

Замедлитель (графит) нужен для замедления образующихся при делении урана быстрых нейтронов до тепловых скоростей, когда нейтроны находятся в тепловом равновесии с атомами среды. Энергия тепловых нейтронов равна приблизительно 0,03 эВ. Замедляют нейтроны потому, что вероятность захвата нейтрона ядром урана-235 больше именно при малых скоростях нейтронов, а захваты нейтро-

нов с энергиями менее 1 МэВ ураном-238 к делению ядер не приводят и поэтому нежелательны.

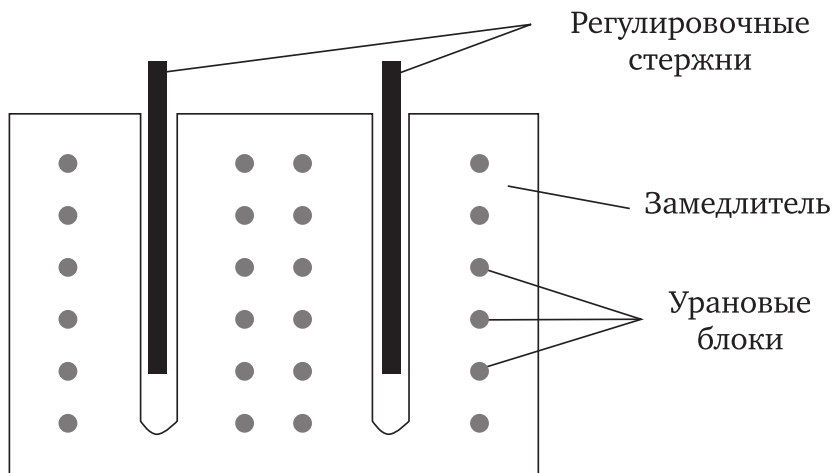


Рис. 54

Нейтроны замедляются за счет упругого рассеяния в графите. При каждом столкновении с ядром графита нейтрон передает ему часть энергии. Чтобы замедлиться от энергии 2 МэВ до тепловой энергии, нейтрону требуется около 100 столкновений.

Регулировочные стержни содержат кадмий или бор, которые обладают способностью интенсивно поглощать нейтроны. Введение стержней в реактор уменьшает коэффициент размножения нейтронов вплоть до заглушения реактора, а выведение стержней увеличивает коэффициент размножения нейтронов. Коэффициентом размножения нейтронов называется отношение количеств нейтронов, рождающихся в двух последующих поколениях. С помощью специального автоматического устройства управления стержнями можно поддерживать мощность реактора на заданном уровне.

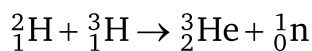
То, что изображено на рис. 54, называют активной зоной реактора. В ней выделяется кинетическая энергия осколков деления, которые при своем замедлении вызывают сильный разогрев урановых блоков, что и используется для выработки электроэнергии. Энергия, выделяемая в активной зоне, выносится оттуда с помощью какого-либо теплоносителя, например обычной воды. Вода циркулирует в замкнутом контуре (называемом первичным), проходя через активную зону, охлаждает уран, нагревается, за пределами активной зоны передает энергию теплообменнику и далее эта энергия используется по обычной схеме работы тепловых электростанций.

*Цепная ядерная реакция деления* в атомной бомбе протекает уже не на тепловых, а на быстрых нейтронах. В качестве делящегося вещества используется не природный уран, а выделенный из него специальными методами чистый изотоп уран-235 (или плутоний-239). Если масса куска делящегося материала меньше некоторой критической массы, то большинство испущенных при делениях нейтронов вылетит

наружу, не вызывая деления. При массе, большей критической, нейтроны быстро размножаются, и реакция имеет взрывной характер. В атомной бомбе цепную реакцию осуществляют путем быстрого соединения двух частей ядерного заряда в один кусок с массой, большей критической. Для этого с помощью обычного взрывчатого вещества (запала) просто выстреливают одну часть ядерного заряда в другую внутри массивной металлической оболочки, способной отражать нейтроны.

### 3.12. Термоядерный синтез

Слияние легких ядер в более тяжелое ядро сопровождается выделением еще большей энергии (в расчете на один нуклон), чем при делении тяжелых ядер. Например, в термоядерной бомбе протекает реакция синтеза дейтерия и трития (изотопы водорода, почему и бомбу часто называют водородной):



При этом выделяется энергия, равная 17,6 МэВ, т.е. 3,5 МэВ на нуклон. При делении же ядра урана освобождается всего лишь 0,85 МэВ на нуклон.

*Слиянию ядер существенно препятствует кулоновский барьер, обусловленный сильным взаимным отталкиванием одноименных электрических зарядов. Преодолеть кулоновский барьер можно повышением температуры легких ядер до миллионов градусов, что в водородной бомбе достигается путем предварительного взрыва обычной атомной бомбы, при котором температура доходит до  $10^7$  К.*

В окружающем нас мире непрерывно происходит синтез легких ядер. Например, основным источником энергии Солнца и других звезд, внутри которых температура достигает  $10^7$ — $10^8$  К, является синтез ядер водорода в ядра гелия.

*К сожалению, упомянутые термоядерные реакции неуправляемы. Для осуществления управляемой реакции синтеза необходимо создать и поддерживать в некотором объеме температуру порядка  $10^8$  К, при которой все тела превращаются в полностью ионизированную плазму. В принципе, удерживать некоторое время разогретую плазму без соприкосновения со стенками можно с помощью магнитного поля особой конфигурации, в котором частицы плазмы можно заставить двигаться по некоторым траекториям в пределах ограниченного объема.*

Изучение комплекса проблем, связанных с созданием управляемого термоядерного реактора, проводится во всем мире, ведь в случае удачи человечество может получить практически неисчерпаемый источник энергии. Пожелаем всем нам успеха на этом пути!



### 3.13. Некоторые перспективы

Существует проект международного экспериментального термоядерного реактора — ИТЭР (ITER). Цель проекта — изучение физических и технологических проблем на пути создания действующего термоядерного реактора. Уже выбрано место для строительства экспериментального реактора — исследовательский центр Кадараш (фр. *Cadarache*) на юге Франции. Весьма солиден список стран-участниц проекта: страны Евросоюза, США, Канада, Япония, Китай, Индия, Республика Корея и, разумеется, Россия.

Стоимость проекта оценивается примерно в 15 млрд долл. (по состоянию на 2010 г.).

ITER относится к термоядерным реакторам типа «токамак». Реализуется реакция синтеза дейтерия и трития, приведенная в параграфе 3.12.

Россия занимает одну из ключевых позиций в реализации международного проекта ИТЭР. Вклад России в проект ИТЭР заключается в изготовлении и поставке высокотехнологичного оборудования, основных систем реактора, что составляет 10% от стоимости сооружения реактора по техническому проекту.

Завершение строительства и начало первых экспериментов с плазмой намечено на 2019 г. В целом сооружения ITER будут представлять собой 60-метровый колосс весом 23 тыс. т.

Официальный международный сайт проекта ITER: [www.iter.org](http://www.iter.org).

Официальный российский сайт проекта ITER: [www.iterrf.ru](http://www.iterrf.ru).

### Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте два постулата специальной теории относительности: принцип относительности Эйнштейна и принцип постоянства скорости света.
2. Можно ли пользоваться преобразованиями Галилея при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую или правильнее пользоваться преобразованиями Лоренца?
3. Понятие одновременности в действительности является абсолютным или относительным?
4. Время в разных системах отсчета течет одинаково или неодинаково?
5. Пространство и время являются взаимосвязанными или независимыми друг от друга?
6. Чему равна энергия неподвижной частицы с массой  $m$ ?
7. Какова модель атома по Резерфорду?
8. В чем суть двух постулатов Бора?
9. Сформулируйте гипотезу де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме.
10. Применимо ли понятие траектории к микрочастицам? В чем суть соотношения неопределенностей Гейзенберга?
11. В чем заключается физический смысл волновой функции?
12. Позволяет ли уравнение Шредингера найти волновые функции частиц, движущихся в различных силовых полях?
13. Какие квантовые числа описывают состояние электрона в атоме?



14. О чем говорит принцип Паули?
15. Что такое вынужденное или индуцированное излучение и каковы его особенные свойства?
16. Что такое инверсная населенность энергетических уровней?
17. Опишите принцип действия рубинового лазера.
18. Из каких частиц состоит атомное ядро? Стабильны ли эти частицы в свободном состоянии?
19. Что называют энергией связи атомного ядра? Что такое удельная энергия связи нуклона в ядре?
20. Назовите два энергетически выгодных процесса использования ядерной энергии.
21. Из чего состоит активная зона простейшего уран-графитового реактора? Какова роль замедлителя? Как отводится энергия из активной зоны?
22. Приведите пример реакции термоядерного синтеза дейтерия и трития.
23. Как можно удержать плазму, разогретую до миллионов градусов, без уничтожения (испарения) стенок конструкции?

### **Список использованной литературы к главам 2 и 3**

1. *Алешкевич, В. А.* Курс общей физики. Молекулярная физика / В. А. Алешкевич. — М. : Физматлит, 2016.
2. *Алешкевич, В. А.* Университетский курс общей физики. Механика / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев. — М., Физматлит, 2011.
3. *Алешкевич, В. А.* Университетский курс общей физики. Электромагнетизм / В. А. Алешкевич. — М. : Физматлит, 2014.
4. *Мэрион, Дж. Б.* Общая физика с биологическими применениями / Дж. Б. Мэрион. — М. : Высшая школа, 1986.
5. *Мэрион, Дж. Б.* Физика и физический мир / Дж. Б. Мэрион. — М. : Мир, 1975.
6. *Савельев, И. В.* Курс физики. В 3 т / И. В. Савельев. — М. : Наука, 1989.
7. *Спасский, Б. И.* Физика для философов / Б. И. Спасский. — М. : Изд-во МГУ, 1989.

## Список рекомендуемой литературы

1. *Алешкевич, В. А.* Курс общей физики. Молекулярная физика / В. А. Алешкевич. — М. : Физматлит, 2016.
2. *Алешкевич, В. А.* Университетский курс общей физики. Механика / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев. — М. : Физматлит, 2011.
3. *Алешкевич, В. А.* Университетский курс общей физики. Электромагнетизм / В. А. Алешкевич. — М. : Физматлит, 2014.
4. *Грин, Н.* Биология. Т. 1—3 / Н. Грин, У. Стаут, Д. Тейлор. — М. : Мир, 1990.
5. *Лосев, К. С.* Проблемы экологии России / К. С. Лосев [и др.]. — М. : Изд-во ВИНТИ, 1993.
6. *Медоуз, Д. Х.* За пределами роста / Д. Х. Медоуз, Д. Л. Медоуз, Й. Рандерс. — М. : Прогресс, 1994.
7. *Медоуз, Д. Х.* Пределы роста / Д. Х. Медоуз [и др.]. — М. : Изд-во МГУ, 1991.
8. *Мэрион, Дж. Б.* Общая физика с биологическими применениями / Дж. Б. Мэрион. — М. : Высшая школа, 1986.
9. *Савельев, И. В.* Курс физики. Т. 1—3 / И. В. Савельев. — М. : Наука, 1989.
10. *Спасский, Б. И.* Физика для философов / Б. И. Спасский. — М. : Изд-во МГУ, 1989.
11. *Форрестер, Дж.* Мировая динамика / Дж. Форрестер. — М. : Наука, 1978.

## **Новые издания по дисциплине «Естествознание: физика» и смежным дисциплинам**

1. *Бордовский, Г. А.* Физические основы естествознания : учеб. пособие для академического бакалавриата / Г. А. Бордовский. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017.

2. *Смирнова, М. С.* Естествознание : учебник и практикум для прикладного бакалавриата / М. С. Смирнова, М. В. Нехлюдова, Т. М. Смирнова. — М. : Издательство Юрайт, 2017.

## Концептуальная программа курса «Основы естествознания и глобальные проблемы»

1. Введение. Естествознание и естественные науки. Цель естествознания. Анализ и синтез в процессе познания окружающего нас мира. О роли эксперимента в процессе познания.

2. Глобальные проблемы современности. Серьезные признаки ухудшения ситуации у нас в стране и в мире. Что мешает разработке концепции глобального развития человечества. Мыслительные модели окружающего нас мира и их недостатки. Компьютерные модели и их преимущества. Особенности поведения сложных нелинейных систем со многими цепями обратной связи. О связи причины и следствия в сложных системах. «Мировая динамика» Джея Форрестера.

3. Пределы роста. Прогноз основных тенденций развития на ближайшее будущее. Влияние научных и технических достижений на поведение глобальной модели. Многоуровневая компьютерная модель системы мирового развития М. Месаровича и Э. Пестеля.

4. Термодинамические аспекты концепции глобального развития. Статистическая физика и термодинамика. Первое начало термодинамики. Равновесный или квазистатический процесс. Адиабатический процесс. Второе начало термодинамики. Энтропия. Функция состояния. Термодинамическая вероятность состояния. Физический смысл энтропии. Идеальная тепловая машина и ее коэффициент полезного действия.

5. О концепции тепловой смерти Вселенной. Открытые системы и неравновесная термодинамика. Энтропия биосферы. О принципиальных возможностях выхода из глобального кризиса с точки зрения термодинамики.

6. Естественнонаучная картина мира. Вселенная. Метагалактика. Галактика. Звезды. Солнце. Фундаментальные взаимодействия в природе. Природа сил в классической механике. Границы применимости классической механики.

7. Основные законы классической механики. Законы Ньютона. Закон всемирного тяготения. Законы сохранения: механической энергии, импульса и момента импульса. Центр масс (центр инерции). Преобразования Галилея и принцип относительности Галилея.

8. Колебания и волны, основные понятия. Звуковые волны. Акустический спектр. Тембр звука. Скорость звука.

9. Электромагнетизм. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Потенциал и разность потенциалов. Постоянный ток. Закон Ома и правила Кирхгофа. Переменный ток. Закон Ома для переменного тока.

10. Магнитные свойства всего живого и неживого. Современные представления о природе магнитных взаимодействий. Электромагнитная индукция. Магнитное поле Земли. Основные положения теории Максвелла. Электромагнитные волны.

11. Сущность специальной теории относительности. Преобразования Лоренца. Относительность понятия одновременности. Сложение скоростей в теории относительности.

12. Строение атома. Модель атома Резерфорда. Постулаты Бора. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотеза де Бройля. Уравнение Шредингера и волновая функция. Квантование энергии. Собственные значения энергии и собственные функции задачи. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

13. Вынужденное излучение и принцип действия лазера. Энергия связи ядра атома. Деление ядер. Ядерный реактор. Термоядерный синтез.