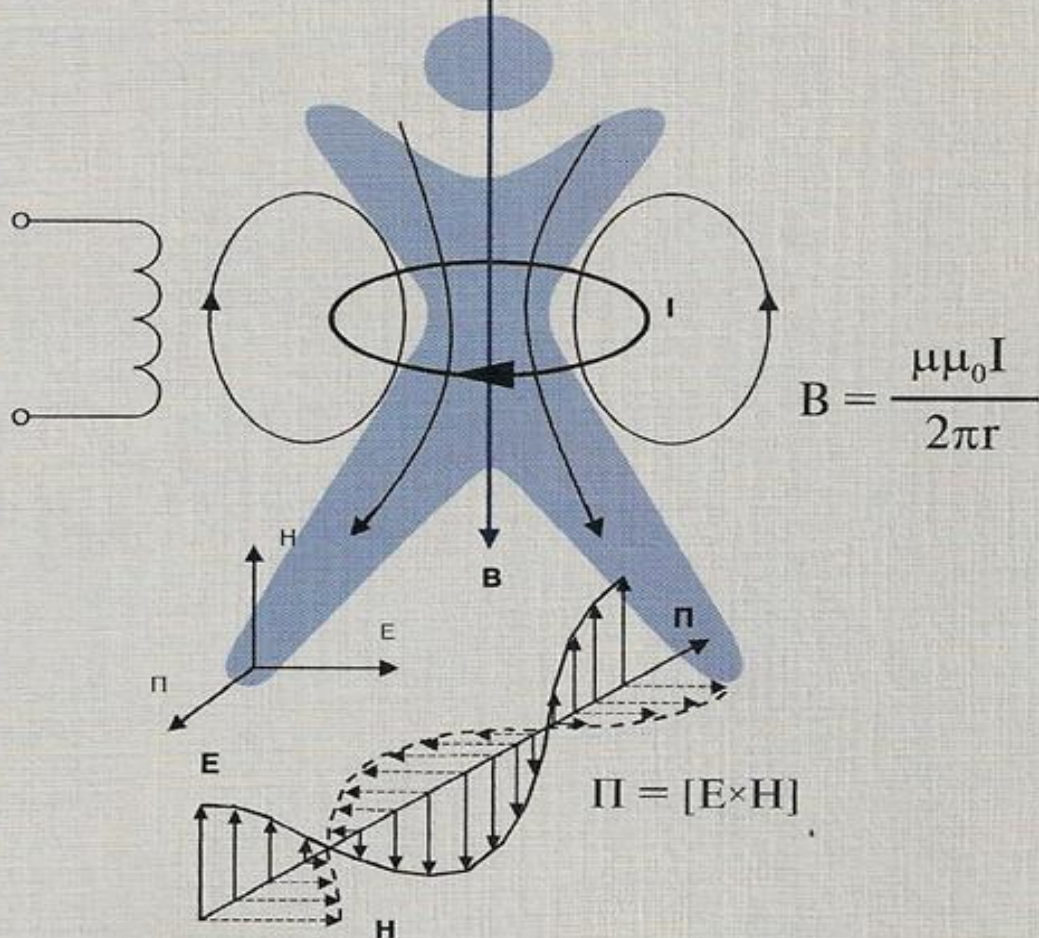


Д.А.Рогаткин  
Н.Ю.Гишинская

# ИЗБРАННЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ

для  
физиотерапевтов



УДК 615.844.3.  
ББК 53.54.  
Р59

*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в любой форме и любыми средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.*

**Авторы:**

**Рогаткин Дмитрий Алексеевич**, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник Московского областного научно-исследовательского клинического института им. М.Ф.Владимирского  
**Гилянская Нонна Юрьевна**, канд. мед. наук, зав. кафедрой физиотерапии факультета усовершенствования врачей Московского областного научно-исследовательского клинического института им. М.Ф.Владимирского

**Рецензенты:**

**Илларионова В.Е.**, докт. мед. наук, профессор кафедры медицинской реабилитации и физических методов лечения Государственного института усовершенствования врачей Министерства обороны РФ

**Агасаров Л.Г.**, докт. мед. наук, профессор, заведующий курсом традиционных методов лечения и физиотерапии факультета последипломного профессионального образования ММА им. И.М.Сеченова

**Рогаткин Д.А.**

Р 59 Избранные вопросы физики для физиотерапевтов /  
Д.А.Рогаткин, Н.Ю.Гилянская. – М.: МЕДпресс-информ, 2007. – 112 с. : ил.  
ISBN 5-98322-284-8

В книге в увлекательной и сжатой форме описаны основные физические факторы, величины и явления, используемые в практике физиотерапии: механические факторы и явления, электростатика, постоянный и переменный электрический ток, магнитные поля, свет как электромагнитная волна, квантовые оптические явления. В приложении отражены справочные данные о понятиях скалярных и векторных величин, приведены основные физические константы в Международной системе единиц. Представлены также некоторые исторические сведения о путях становления и развития современной физики и о большом вкладе в этот процесс представителей медицинской науки.

Книга предназначена для практикующих физиотерапевтов, аспирантов, ординаторов, студентов медицинских вузов и колледжей, изучающих физику. Книга будет также полезна врачам любых других специальностей, школьникам старших классов, да и просто всем, кто интересуется классической общей физикой в ее наиболее простом и доступном изложении.

УДК 615.844.3.  
ББК 53.54.

ISBN 5-98322-284-8

© Рогаткин Д.А., Гилянская Н.Ю., 2007  
© Оформление, оригинал-макет.  
Издательство «МЕДпресс-информ», 2007

# Оглавление

---

Введение.....	4
Глава 1. Механические физические факторы и явления .....	10
Глава 2. Факторы статического электричества (электростатика).....	23
Глава 3. Постоянный электрический ток.....	35
Глава 4. Постоянное магнитное поле (магнитостатика). .....	43
Глава 5. Переменный электрический ток и электромагнитное поле.....	51
Глава 6. Свет как электромагнитная волна.....	73
Глава 7. Квантовая природа света и квантовые оптические явления.....	88
 ПРИЛОЖЕНИЯ.....	 96
Приложение 1. Скалярные и векторные величины. ....	96
Приложение 2. Международная Система Единиц (СИ) .....	100
Приложение 3. Некоторые основные физические (мировые) константы.....	104
 Рекомендуемая литература .....	 105
Предметный указатель .....	106

Вниманиею читателя: данная электронная версия книги является исправленной версией 1-го издания книги, вышедшего в свет в издательстве «МЕДпресс-информ» в 2007г. Поскольку книга в пиратской копии появилась в интернете в открытом доступе уже в 2008г., что сделало ее тираж полностью убыточным и для издательства, и для авторов, авторы приняли решение самостоятельно выложить свою книгу для открытого доступа на сайте лаборатории МОНИКИ [www.medphyslab.ru](http://www.medphyslab.ru), предварительно исправив выявленные в 1-ом тираже ошибки и опечатки. В общей сложности на написание и издание книги, а также на исправление и подготовку электронной версии книги у авторов ушло около 18 месяцев работы, если исходить из 8-часового рабочего дня и 40-часовой рабочей недели. Книга была написана в инициативном порядке, вне рабочего времени авторов, поэтому эта работа никем не оплачивалась... Пусть этой информации порадуются все пираты, промышляющие в интернете. Дополнительно, будем признательны всем добропорядочным читателям за присланные замечания и дополнения к данной книге, а также указания на оставшиеся опечатки/ошибки.

*Авторы*

## Введение

---

На заре развития науки существенной грани между медициной и физикой не существовало. Во многом именно врачи создавали и «открывали» физику. Скажем, врачи древнего мира (один из них – легендарный римский врач **Гален**, II век н.э.) заложили основы науки о теплоте и ввели в обиход медицины и науки в целом такие базовые ее понятия, как «температура» и «градус». Много врачей занималось физическими проблемами и исследованиями в эпоху Возрождения и в последующие периоды открытия и изучения электричества. Сам термин «электричество», например, ввел в науку **Уильям Гильберт** (1540-1603) – английский ученый-физик и, одновременно, лейб-врач английской королевы Елизаветы (не путайте с математиком Давидом Гильбертом – он жил намного позже и занимался вопросами теории чисел и оснований геометрии). Высшее медицинское образование было у знаменитого вождя французской буржуазной революции **Марата**, который в 1783г., кроме всего прочего, написал одно из первых в мире научных сочинений по электротерапии. Французский врач **Жан-Луи Пуазейль** (1799-1869) исследовал законы движения крови в сердце, артериях, венах и капиллярах и впоследствии сформулировал их в виде важных общих физических формул, за что в физике его именем названа единица измерения динамической вязкости жидкости – пуаз. **Жан-Бернар-Леон Фуко** (1819-1868), также врач по образованию, одним из первых в мире измерил скорость света в воде, а также сконструировал специальный 67-метровый маятник, носящий ныне его имя, который сохраняет плоскость колебаний и с помощью которого было окончательно и однозначно доказано вращение Земли вокруг оси. Врач **Юлиус Роберт Майер** (1814-1878) свое первое открытие сделал в 26-27 лет, когда работал корабельным врачом в тропиках. Он открыл зависимость цвета крови от насыщения ее кислородом и изменение этого цвета в зависимости от окружающей температуры. В физике же сегодня он считается основоположником закона сохранения и превращения одного вида энергии в другой<sup>1</sup>. Его физические исследования касались превращений механической энергии в тепло, энергии трения в электричество, солнечной энергии в химическую и т.п. В частности, он предсказал возможность замены химической энергии в дви-

---

<sup>1</sup> Нельзя не отметить, что его судьба в связи с этим, в отличие от многих других врачей-физиков, была в каком-то смысле трагической. Современники-физики (в конце XIX века это было уже хорошо организованное научное сообщество) не приняли его работ по причине «неясности изложения мысли» и содержания целого ряда ошибок в изложении материала и терминологии (все же Ю.Р. Майер не был профессионалом-физиком в полном смысле этого слова, а оставался в физике дилетантом). Его травили в газетах и обвиняли в непрофессионализме, приписывали ему манию величия. Подвергли даже принудительному «лечению» в психиатрической больнице. В 1850г. в связи с этим Майер пытался покончить жизнь самоубийством, выбросившись из окна, но остался жив, хотя и хромым на все оставшееся ему еще 27 лет жизни. Истинное же признание его работы по закону сохранения энергии получили уже после его смерти.

гателях внутреннего сгорания на электрическую энергию, т.е. предсказал создание электрических моторов.

Одним из самых знаменитых физиков второй половины XIX столетия считается **Гельмгольц** (Герман Людвиг Фердинанд, 1821-1894). Однако первоначально он получил медицинское образование и даже защитил диссертацию, посвященную строению нервной системы. Физикой он увлекался в свободное от медицины время, но очень быстро его физические работы по законам сохранения, особенно закону сохранения живой силы (кинетической энергии), стали известны физикам всего мира. Рассматривая электричество и магнетизм, Гельмгольц дает известный вывод выражения э.д.с. индукции, рассматривает связь этих явлений с биологией и медициной. За эти работы в 1849г. он получил должность экстраординарного профессора кафедры физиологии и общей патологии медицинского факультета Кенигсбергского университета, где и вышла в свет его легендарная работа «Физиологическая оптика», которая явилась основой создания современной физиологии зрения. Однако с 1871г. Гельмгольц занимается созданием в Берлине уже собственного физико-технического института и успешно создает такой институт, в который съезжаются работать многие талантливые физики со всего мира. Он также явился одним из создателей Государственного центра немецкой метрологии. Его работы по физике существенно обогатили такие разделы этой науки, как акустика, гидродинамика, оптика и др.

И, завершая краткий рассказ об известных врачах-физиках того времени, нельзя не упомянуть одного из самых талантливых ученых среди них – **Томаса Юнга**. Томас Юнг (1773-1829), врач по образованию и по профессии, в том числе доктор медицины, стал одним из самых известных физиков мира, обогатив физическую науку исследованиями в области оптики (волновая теория света) и теории упругости. Например, важнейшая константа в теории упругости – модуль Юнга – носит сегодня его имя. Интересно отметить, что Томас Юнг, видимо, был человеком просто уникальным. Он научился читать в 2 года. К 14 годам уже в совершенстве владел 10 языками, включая персидский и арабский. Позже научился играть почти на всех музыкальных инструментах того времени, а в качестве хобби (!) выступал цирковым артистом – наездником и канатоходцем. Ему же принадлежит серьезная заслуга в расшифровке Египетских иероглифов, а также ряд фундаментальных научных трудов по истории, математике и ботанике. Но Юнг занимался серьезно не только физикой, но и медициной. Именно он, например, открыл дефект зрения, связанный с неспособностью различать зеленые и красные цвета. По иронии судьбы, правда, это открытие в медицине обессмертило имя не врача Юнга, а физика Дальтона, у которого первым этот дефект и был обнаружен.

Современный этап развития медицины, наоборот, базируется на интенсивном внедрении в практическое здравоохранение последних достижений точных физических и физико-технических наук – квантовой микроэлектроники, лазерной техники, компьютерных техноло-

гий и т.п. С конца XIX – начала XX века, где-то с момента открытия радиоактивности, работ **В.Рентгена**<sup>2</sup> и появления первых радиотехнических и оптико-электронных медицинских приборов и устройств, огромную роль в развитии медицины и ее приборной базы начинают играть профессиональные физики, математики и инженеры. С конца XX века создается (возрождается<sup>3</sup>) даже специальное новое и пограничное направление в физике – *медицинская физика*, специалисты по которому начинают готовиться и выпускаться крупнейшими высшими техническими учебными заведениями всего мира. Большое распространение и признание во всем мире получает идеология “Evidence based medicine” (доказательная медицина), отражающая факт глубокого проникновения в медицину строгих физико-математических методов анализа и обработки результатов наблюдений, методов поиска и обоснования причинно-следственных связей и закономерностей, логического вывода и доказательств возможных вариантов развития ситуации и на основе полученных данных. Стремительными темпами развиваются междисциплинарные научные исследования по биофизике клетки и тканей человека, фотохимии и фотобиологии, генной инженерии, теории сложных психофизиологических и функциональных систем. Все это в большой степени сегодня задает новый вектор развития практической медицины в сторону все более тесного ее контакта и содружества с самыми разнообразными другими фундаментальными и прикладными науками. И физика, как «королева» всех наук, стоит здесь, безусловно, на самом первом месте. А физиотерапия, со своей стороны, - наиболее близкий и родственный физике раздел во всей практической медицине.

По всем канонам классификации разделов современной медицины физиотерапия относится к терапевтическим (консервативным) методам лечения. Она использует в своей лечебной практике и в целях профилактики различных заболеваний разнообразные физические воздействия и факторы. Именно использование физических полей, воздействий и явлений лежит в основе любых методов и приборов физиотерапии. Сюда относятся все электрические токи, магнитные поля, оптическое и лазерное излучение, механические воздействия, тепло, ультразвук – все то, что создается техническими приборами или существует само по себе в природе (природные физические лечебные факторы). Соответственно, умение врача-физиотерапевта грамотно разбираться в базовых понятиях современной физики, умение оперировать физическими законами, терминами и величинами, рассчитывать амплитуды, плотности мощности, плотности энергии и другие характеристики действующих во время проведения лечебных процедур разных физиче-

---

<sup>2</sup> **В.К.Рентген** (1845-1923) – великий немецкий физик, первый Нобелевский лауреат по физике, открывший «таинственные» лучи, носящие ныне его имя.

<sup>3</sup> Если говорить исторически более строго, то медицинская физика начинает свой отчет с конца XVII – начала XVIII века, с момента создания теории электричества на основе работ Б.Франклина, Ш.Дюфе, О.Кулона, А.Вольта, Л.Гальвани и других физиков того времени. А в 1808г. в России уже выходит в свет «Российский медико-физический журнал» (см. [www.medphyslab.ru](http://www.medphyslab.ru), раздел «разное»).

ских факторов – все это является неотъемлемой частью его профессиональной подготовки, его профессиональных знаний и навыков.

Конечно, основы элементарной и общей физики любой современный врач подробно изучал еще в школе, училище и/или вузе. Но с годами многое забывается. Много появляется новых методов и приборов, о которых ранее было известно крайне мало или не было известно вовсе. Так, лазеры в медицину стали широко внедряться лишь с середины 1980-х годов, и многие физические процессы, связанные с распространением лазерного излучения как электромагнитной волны, с одной стороны, и как элементарных квантовых частиц – фотонов, с другой стороны, остались за рамками базового образования целого поколения еще успешно работающих и опытных клиницистов. Поэтому врачу часто необходимо иметь под рукой некий свежий справочный материал, позволяющий как вспомнить забытые разделы и термины физики, так и восполнить существующие пробелы в знаниях по ряду разделов и явлений, которые (чего греха таить!), как правило, всегда имеются даже у профессионалов достаточно высокого класса.

С этой целью в данной книге собраны основные сведения из современной элементарной физики и ее истории, позволяющие практически с нуля понять и изучить то или иное физическое явление на уровне, достаточном для его практического использования в физиотерапии. Слова «практически с нуля» следует понимать в том смысле, что во многом эти сведения изложены даже на уровне не вуза или медицинского колледжа, а элементарного школьного учебника физики, что облегчает восприятие материала любым неподготовленным представителем не только медицины, но и других профессий. С другой стороны, физика, все же, является сегодня слишком обширной областью знаний, причем очень тесно связанной с математикой, химией и другими точными науками, так что изложение даже элементарных вопросов физики действительно «с нуля» в сколько-нибудь ограниченном объеме одного печатного издания просто не представляется возможным. Уместно напомнить, что уже школьные учебники физики – это несколько томов теорий и задач, начиная с пятого и заканчивая одиннадцатым классом. Следовательно, в той или иной степени приходится предполагать, что читатель, все же, знаком с базовыми понятиями и методами как теоретической и экспериментальной физики, так и математики. Ему в общем случае подробно и «с нуля» не надо объяснять, например, что такое скорость и температура тела, плотность и объем вещества, молекула или атом. Он умеет оперировать простейшими математическими операциями, знаком с понятиями «площадь поверхности», «декартова система координат», скалярными и векторными величинами. Остальные же сведения из физики и, частично, математики, специфичные для практикующего физиотерапевта, в данном издании изложены по возможности максимально подробно и последовательно.

Обычно, правда, во многих руководствах по физиотерапии изложение вопросов действующих физических факторов начинается с постоянного электрического тока. В нашем руково-

дстве эта традиция нарушена. Дело в том, что физика исторически развивалась от механики и оптики к электричеству и магнетизму, а не наоборот. И многие шаблоны и методы, отработанные в механике или оптике, впоследствии успешно переносились в другие, новые разделы физики, делая всю физику логически стройной, замкнутой и преемственной системой знаний. Поэтому, принятая в данном издании классическая последовательность изложения материала в физике представляется нам более понятной и удобной для изучения. Единственное, чего не удалось избежать полностью, и что, к сожалению, часто присутствует в любых, даже самых лучших учебниках и руководствах по физике, – это использование в ряде разделов терминов и понятий (в частности – единиц измерений физических величин), подробное описание и пояснения для которых содержатся в других, последующих разделах издания. Причина здесь заключается в том, что разные разделы физики развивались не только последовательно, но и параллельно друг другу. Многие термины и понятия впоследствии пересматривались, дорабатывались и сегодня используются уже в более универсальном и стандартизованном виде, нежели это было принято в период первоначальных открытий. Поэтому нет смысла приводить некоторые первичные формулировки и определения, а правильнее было бы сразу подавать материал, в частности, Международную систему единиц измерения физических величин<sup>4</sup> (систему «СИ») в том виде, как она принята сегодня во всем мире. Так мы и поступили. Цена же этому – некоторое неудобство в восприятии части материала. Однако еще раз подчеркнем, что мы видим своего читателя как человека все же знакомого с базовыми понятиями физики. И если в разделе 3, например, упоминается слово «вольт» до того как дается ему точное определение, то это, как мы предполагаем, не вызовет у читателя полного непонимания прочитанного. В крайнем случае, всегда можно вернуться назад и перечитать заново предыдущие абзацы. Можно заглянуть и вперед, например, в справочный материал, данный в приложении, и найти интересные читателя дополнительные пояснения. В приложении мы постарались собрать необходимый дополнительный набор сведений из физики и математики. Серьезную литературу по физике, кстати, практически никогда не удастся прочитать и понять сразу, с листа. Часто приходится по несколько раз перечитывать многие предыдущие абзацы и главы, а иногда и использовать имеющиеся дополнительные справочники и учебники, чтобы полностью осознать и, главное, «почувствовать» изучаемый материал. Это еще одна особенность физики, о которой уместно было бы напомнить в самом начале изложения: физику по-настоящему можно понять, только внутренне почувствовав всю логику, единство и взаимосвязь явлений.

В основу изложенного в данной книге материала положен авторский курс лекций, который читался авторами на протяжении нескольких лет на кафедре физиотерапии Факультета

---

<sup>4</sup> См. Приложение 2.

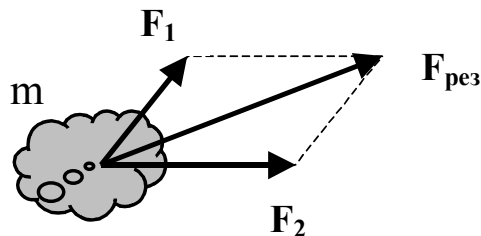


усовершенствования врачей (ФУВ) МОНИКИ им. М.Ф.Владимирского. Книга не претендует на полное изложение основ всех существующих сегодня разделов физики, а призвана помочь врачам-физиотерапевтам вспомнить и понять те разделы и явления физики, с которыми им приходится иметь дело в своей повседневной практике. Данное издание может быть полезно как начинающим, так и опытным и давно практикующим физиотерапевтам, врачам других специальностей, студентам, ординаторам и аспирантам, пожелавшим подробнее изучить или освежить в своей памяти базовые вопросы существующих физических явлений и факторов, применяемых в современной медицине.

# Глава 1. Механические физические факторы и явления

Фундаментальным понятием всей современной физики является понятие *силы* (приложенная сила, действующая сила, механическая сила, сила упругости и т.п.), определяющее меру механического воздействия на некое материальное тело, в результате которого это материальное тело начинает двигаться с ускорением, т.е. менять свои координаты, скорость и/или направление движения, а также, в ряде случаев, деформироваться. Исторически понятие силы вводилось в физику постепенно, работами целой плеяды великих физиков и математиков XVII-XVIII веков, таких как **Христиан Гюйгенс**<sup>5</sup> (1629-1695), **Готфрид Лейбниц**<sup>6</sup> (1646-1716) и **Исаак Ньютон** (1643-1727). Но только последний сумел четко, однозначно и очень продуктивно определить силу, как «*действие*, производимое на тело для изменения его состояния».

Сегодня в физике сила – величина векторная, характеризуемая в каждый момент времени своим численным значением (амплитудой, модулем), направлением действия и точкой приложения к телу. Соответственно, при действии на тело одновременно нескольких сил, результирующим действием будет обладать некая результирующая сила, определяемая через векторную сумму всех одновременно действующих на тело сил (Рис.1.1)<sup>7</sup>.



**Рис. 1.1.** Образование и вычисление результирующей действующей силы  $F_{рез}$  на материальное тело массы  $m$ , при одновременном действии на него сил  $F_1$  и  $F_2$ .

Само по себе понятие силы в физике – весьма общее и отвлеченное понятие, не привязанное к какому-либо отдельно взятому телу, виду или типу сил (сила тяжести, сила упругости и т.п.). Оно призвано, лишь, одинаковым образом оценивать количественную меру и направление

<sup>5</sup> Сын дворянина, известный голландский астроном (и юрист по первому образованию), изобрел, в том числе, часы с маятником.

<sup>6</sup> Крупнейший немецкий философ-идеалист, математик и физик, создавший параллельно с Ньютоном основы дифференциального исчисления в математике. Он же ввел термин «динамика» в физику. Однако введенные им понятия «живой» и «мертвой» сил относились не к силе, как к таковой, как ее принято сегодня понимать в физике, а к кинетической и потенциальной энергии тела соответственно.

<sup>7</sup> Здесь и далее в тексте в отличие от обычных скалярных величин все векторные величины будут обозначаться жирным шрифтом. См., также, приложение 1 для более детального знакомства с понятиями векторных и скалярных величин в физике и математике.

воздействия извне на тело или меру взаимодействия двух и более материальных тел между собой. Согласно 2-му закону *Ньютона* в общем случае действие результирующей силы  $\mathbf{F}_{\text{рез}}$  на тело массой  $m$  приводит к появлению у тела ускорения “ $\mathbf{a}$ ”, которое тоже является векторной величиной и характеризуется своим модулем и направлением, как правило, совпадающим с направлением действия силы:

$$\mathbf{F}_{\text{рез}} = m \cdot \mathbf{a} \quad (1.1)$$

Если на тело действует одновременно много разных сил, разной или одной и той же природы (происхождения), часто говорят о *поле действующих сил*. Наиболее наглядным примером поля действующих сил является понятие поля сил тяготения (гравитации), которое создается любым массивным телом вокруг него. Так, два тела массами  $m_1$  и  $m_2$  притягиваются друг к другу вследствие наличия вокруг них поля тяготения по *закону тяготения Ньютона*, согласно которому величина (модуль) силы притяжения двух тел определяется выражением:

$$F_{\text{През}} = F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}, \quad (1.2)$$

где:  $G$  – фундаментальная *гравитационная постоянная*, определяемая опытным путем ( $G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ), а  $R$  – расстояние в метрах между центрами масс рассматриваемых тел.

В международной системе единиц (СИ), которой мы и будем стараться всегда придерживаться, любая действующая сила измеряется в «ньютонах» (обозначается буквой «Н»), подобно тому, как масса измеряется в килограммах, а расстояние в метрах. С другой стороны всегда полезно помнить, что согласно выражению (1.1), один «ньютон» всегда может быть пересчитан следующим образом:

$$1\text{Н} = 1\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

т.е. эта величина – «ньютон» - является производной размерной величиной от основных единиц измерений в системе СИ – метр, килограмм, секунда.

Если одним из рассматриваемых нами двух тел является наша планета Земля, то выражения (1.1) и (1.2) обычно записывают совместно в виде:

$$F_g = m \cdot g, \quad (1.3)$$

где  $m$  – масса тела, притягиваемого Землей, а  $g$  – ускорение свободного падения тела на Землю, определяемое через массу Земли ( $M_3$ ) и расстояние  $R$  от центра Земли до центра масс падающего на нее тела следующим образом:

$$g = G \cdot \frac{M_3}{R^2} \approx 9.81 \text{ м/с}^2 \quad (\text{у поверхности Земли}).$$

Постоянное наличие гравитации на Земле во многом определяет общее строение тела человека и его отдельных органов и систем. Вестибулярный аппарат, например, специально предназначен для оценки положения тела в условиях Земного притяжения, а в венах система внутренних клапанов дополнительно помогает прокачивать кровь с периферии к сердцу против действия на кровь сил гравитации.

Другим фундаментальным понятием во всей современной физике, наравне с силой, является понятие энергии. *Энергия* – общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. В соответствии с различными формами движения материи рассматривают различные формы энергии – механическую кинетическую и потенциальную энергии, энергию теплового движения молекул, энергию химической связи, ядерную энергию, энергию ионизации атома, энергию кванта света и т.п. Это деление до известной степени весьма условно. Так, энергия теплового движения молекул – это их кинетическая энергия, которую они приобретают в результате нагрева вещества. А кинетическая энергия неупругого удара или внутренней деформации тела легко переходит в энергию теплового нагрева тела. Энергия – величина в физике скалярная.

Один из наиболее всеобщих законов физики и природы в целом гласит, что в изолированной материальной системе общее количество энергии само по себе никогда не изменяется: не исчезает, не уменьшается и дополнительно ниоткуда не возникает. Энергия может лишь переходить из одной своей формы в другую, но общее количество энергии всегда остается в изолированной системе постоянным. Этот закон всем известен сегодня как *закон сохранения энергии*<sup>8</sup>.

Для целей понимания основ физики и, в частности, механических явлений, полезно помнить некоторые основные выражения для разных форм механической энергии, которые могут встретиться на практике:

Кинетическая энергия движущегося со скоростью  $v$  тела:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} . \quad (1.4)$$

Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту  $h$  над поверхностью Земли:

$$E_n = mgh . \quad (1.5)$$

---

<sup>8</sup> Согласно основополагающей теореме **Э.Нётер** (одна из наиболее выдающихся женщин-математиков всего мира) любые законы сохранения (массы, энергии, заряда, импульса и т.п.) следуют из свойств симметрии мира. Так, закон сохранения энергии следует из симметрии законов движения относительно времени: законы не меняются со временем, т.е. все моменты (равные интервалы) времени эквивалентны друг другу.

Энергия покоя любой частицы (тела):

$$E_0 = m_0 \cdot c^2, \quad (1.6)$$

где:  $m_0$  – масса покоя<sup>9</sup> частицы (тела);  $c$  – скорость света в вакууме ( $c \approx 2,998 \cdot 10^8$  м/с).

Средняя энергия теплового движения частицы (по одной степени свободы):

$$E_T = \frac{1}{2} kT, \quad (1.7)$$

где:  $T$  – абсолютная температура в градусах Кельвина ( $^{\circ}\text{K}$ );  $k$  – *постоянная Больцмана* ( $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/ $^{\circ}\text{K}$ )<sup>10</sup>.

Абсолютное значение энергии во всех приведенных выше ее формах измеряется в системе СИ одинаковым образом – в «джоулях» (Дж). Однако, поскольку значение энергии, скажем, для одной отдельно взятой субатомной частицы и значение энергии, например, в импульсе мощного хирургического лазера могут различаться на много порядков<sup>11</sup> по своей абсолютной величине, в физике для указания размерности энергии, как ни для какой другой измеряемой величины, наиболее часто применяются различные производные величины, а также другие системы единиц измерения (подробнее см. Приложение 2.).

Энергия от одного макроскопического тела к другому может передаваться двумя различными способами – в форме *работы* и в форме *теплоты* (т.е. в форме *излучения*<sup>12</sup>). Передача энергии в форме работы происходит при непосредственном силовом взаимодействии (контакте) тел. При этом под работой понимается изменение кинетической, потенциальной или суммарной энергии за какой-либо промежуток времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ :

$$A = E_{t_2} - E_{t_1}, \quad (1.8)$$

где:  $A$  – работа,  $E_{it}$  – значение определяемой энергии тела в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ). Соответственно, работа, как и энергия, измеряется в джоулях (Дж). Если рассматривается механическая работа по прямолинейному перемещению тела за счет действия какой-либо результи-

<sup>9</sup> Согласно одной из интерпретаций теории относительности Эйнштейна масса любого движущегося тела увеличивается с увеличением его скорости, а масса покоя тела (частицы)  $m_0$  определяется для скорости, равной нулю. В других интерпретациях масса тела не меняется со скоростью и соотношение (1.6) верно для любой массы  $m$ . В теоретической физике сегодня нет единого и однозначного мнения по этому вопросу.

<sup>10</sup> Для идеального одноатомного газа коэффициент в формуле станет равным 3/2.

<sup>11</sup> Словосочетания «различается на один, два, три и т.п. порядка» означают в физике и математике соответственно «в 10, 100, 1000 и т.п. раз».

<sup>12</sup> «В форме теплоты...» - старое определение, существовавшее еще до развития *теории излучения электромагнитных волн*, когда «главенствовала» термодинамика. Однако это определение сохранилось еще в ряде школьных учебников физики. Сегодня грамотнее говорить об излучении, в т.ч. тепловом.

рующей силы, неизменной во времени, то работу часто вычисляют через произведение модуля результирующей силы на пройденный телом путь по направлению этой силы:

$$A = F_{рез} \cdot l,$$

где  $l$  – пройденный телом путь под действием результирующей силы. В более сложных случаях вычисления несколько усложняются, правда, к счастью, в практике физиотерапии никакие вычисления механической работы обычно не требуется.

Если энергия от одного тела к другому передается излучением (дистанционно), то чаще требуется знать *мощность* какого-либо источника излучения. В общем случае, если энергия тела менялась за счет излучения равномерно (т.е. линейно) во времени, мощность излучения определяется как отношение приращения энергии к промежутку времени, за которое это приращение произошло:

$$W = \frac{E_{t_2} - E_{t_1}}{t_2 - t_1}, \quad (1.9)$$

где  $W$  – мощность. Или, для равномерной механической работы, мощность – это скорость совершения работы во времени.

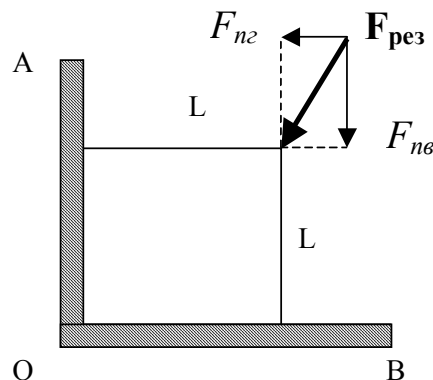
Опять же, в более сложных случаях при неравномерном изменении энергии во времени мощность вычисляется более сложным образом, через так называемые дифференциалы (дифференциальные уравнения), однако в медицинской практике врачам этого обычно делать не приходится. В крайнем случае, сложные вычисления – это уже задача для профессиональных медицинских физиков. Обращайтесь к ним. Практикующим же врачам достаточно понимать формулу (1.9) и знать, что сегодня<sup>13</sup> в системе СИ мощность измеряется в «ваттах» (Вт). И  $1\text{Вт}=1\text{Дж}/1\text{с}$  или  $1\text{Дж}=1\text{Вт}\cdot 1\text{с}$ .

Использование «механических» понятий силы, энергии, работы и мощности позволяет понимать причинно-следственную связь большинства происходящих в природе процессов и явлений и решать подавляющее большинство встречающихся на практике задач. Даже более сложные и открытые намного позже эпохи Ньютона физические явления, такие, скажем, как дискретные энергетические уровни электрона внутри атома, в той или иной форме допускают их «механическую» трактовку. Вообще говоря, очень многие физики придерживаются сегодня известного уже более 100 лет убеждения, что суть понимания любого физического явления, в первую очередь, базируется на поиске его адекватной механической аналогии. Именно поэтому многие приемы и подходы, развитые в механике, в более поздние периоды развития физики ус-

<sup>13</sup> Ранее очень употребительной единицей измерения мощности являлась «лошадиная сила» (л.с.). Одна л.с. равна примерно 735.5 Вт. Однако сегодня эта единица измерения осталась в лексиконе, пожалуй, лишь у автолюбителей.

пешно использовались и используются и поныне и в других ее разделах, вплоть до ядерной физики и квантовой теории поля. В других главах нашей книги Вы в этом неоднократно сможете убедиться сами.

Рассмотрим теперь несколько более конкретных и наиболее часто встречающихся в практике физиотерапевта механических явлений и процессов, а также связанные с ними действующие механические факторы. Если сила  $\mathbf{F}$  действует на какое-либо тело, которое не может прийти в движение под действием этой силы (например, тело прочно закреплено на поверхности Земли или сила действует вертикально вниз на тело, лежащее на ровной горизонтальной поверхности стола), то это тело начинает деформироваться (сжиматься, изгибаться и т.п.), а также давить на свою опору. Пусть, например, кубик с длиной стороны  $L$  лежит в углу комнаты и на его внешнее ребро действует сила  $\mathbf{F}_{\text{рез}}$  как показано на рис. 1.2. (действие силы тяжести в данном примере не учитываем). В этом случае даже интуитивно понятно, что кубик будет оказывать *давление* на свои вертикальную (ОА) и горизонтальную (ОВ) опоры. Это давление можно рассчитать, определив площади поверхности кубика, соприкасающиеся с опорами, и разложив действующую силу на ее горизонтальную ( $F_{n2}$ ) и вертикальную ( $F_{nв}$ ) составляющие. По поводу этих составляющих, т.к. они действуют перпендикулярно каждой своей опоре, говорят, что они действуют по «нормали» к поверхности этих опор. Их часто в связи с этим называют *нормальные компоненты* силы. Запомните это название. Встречаются также и *тангенциальные компоненты*, т.е. компоненты, действующие по касательной к поверхности опор. Мы их пока использовать не будем, хотя каждая из указанных на рисунке компонент результирующей силы является нормальной к поверхности одной из опор и касательной к поверхности другой одновременно. Но нам в данном случае важны именно нормальные компоненты силы для каждой из опор кубика.



**Рис. 1.2.** Пояснения к образованию давления тела на опору.

Если теперь вспомнить, что площади  $S$  всех граней кубика равны между собой и равны  $L^2$ , т.е.  $S=L^2$ , то, поделив каждую нормальную компоненту силы на площадь поверхности грани ку-

бика, можно найти давление, которое оказывает кубик на каждую из опор. Так, для вертикальной опоры ОА давление кубика  $P$  будет составлять:

$$P = \frac{F_{ng}}{L^2} = \frac{F_{ng}}{S}.$$

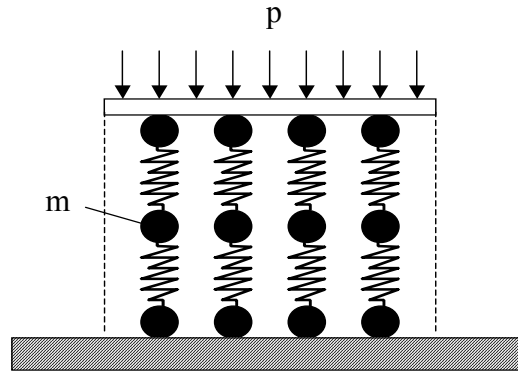
Для горизонтальной опоры ОВ, соответственно, давление равно:  $P = \frac{F_{ng}}{S}$ .

Так в физике определяется понятие давления: это отношение нормальной компоненты вектора действующей силы к площади поверхности, на которую эта сила равномерно действует. Давление в системе СИ измеряется в «паскалях»<sup>14</sup> (Па), т.е.  $1\text{Па}=\text{Н}/\text{м}^2$ . Давление образуется и в жидкостях и в газах за счет упругого взаимодействия молекул и их теплового движения, что обуславливает давление этих молекул на стенки сосуда или любого другого предмета, помещенного в жидкую или газообразную «атмосферу». Всем известно атмосферное давление воздуха. На поверхности Земли оно приблизительно равно  $1 \cdot 10^5$  Па, правда, когда говорят об атмосферном давлении, чаще используют другие единицы измерения давления – одна атмосфера (техническая или физическая), 760 мм ртутного столба и т.д. (см. Приложение 2). Давление создается и кровью в кровеносных сосудах. Растворенные газы в крови – кислород, углекислый газ и т.п. – создают свои парциальные (частичные) давления в крови. Баротерапия – один из разделов физиотерапии (от термина «бар» - вышедшей уже из употребления внесистемной единицы измерения давления; отсюда и барометрия, барометр и т.п.). Давление влияет на скорость (кинетику) различных биохимических и биофизических процессов, причем оно может как ускорять, так и замедлять их. Соответственно, для любых живых систем любые изменения как внешнего, так и разных внутренних давлений весьма ощутимо могут сказываться на всех процессах их жизнедеятельности.

Под действием давления, в первую очередь, обычно происходит сжатие вещества и уменьшение расстояния между его молекулами. Для понимания этого явления можно рассматриваемое вещество условно представить себе в виде отдельных молекул – маленьких масс « $m$ » - соединенных между собой упругими связями – пружинками (рис.1.3). Если сверху на такую систему масс и упругих связей действует давление « $P$ », пружинки (упругие связи) будут сжиматься, а расстояния между массами « $m$ » будет уменьшаться, увеличивая плотность вещества. Как правило, это приводит и к добавочному увеличению температуры тела за счет более «стесненного» положения молекул и соответствующего увеличения скорости их тепловых движений (колебаний) и частоты столкновений, т.е. энергия сжатия часто переходит внутри тела в его дополнительную тепловую энергию.

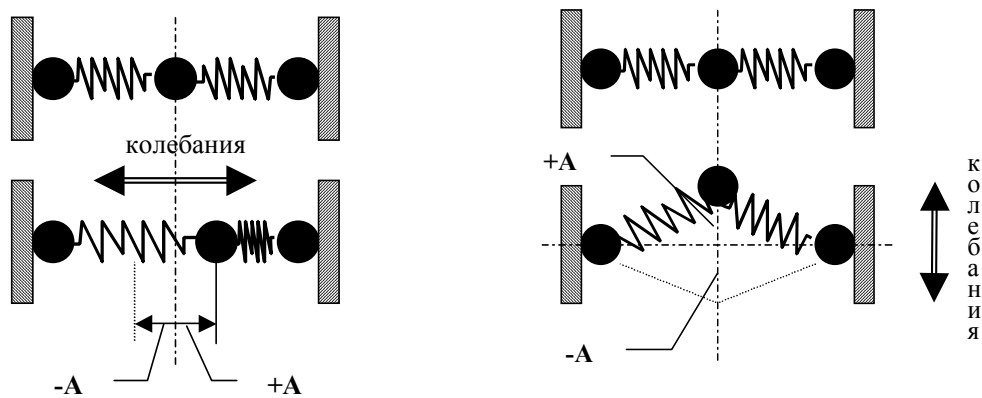
<sup>14</sup> В честь замечательного французского математика, физика и философа **Блеза Паскаля** (1623-1662), автора закона о сообщающихся сосудах и равномерной передаче давления жидкостью.





**Рис. 1.3.** Сжатие вещества под действием давления.

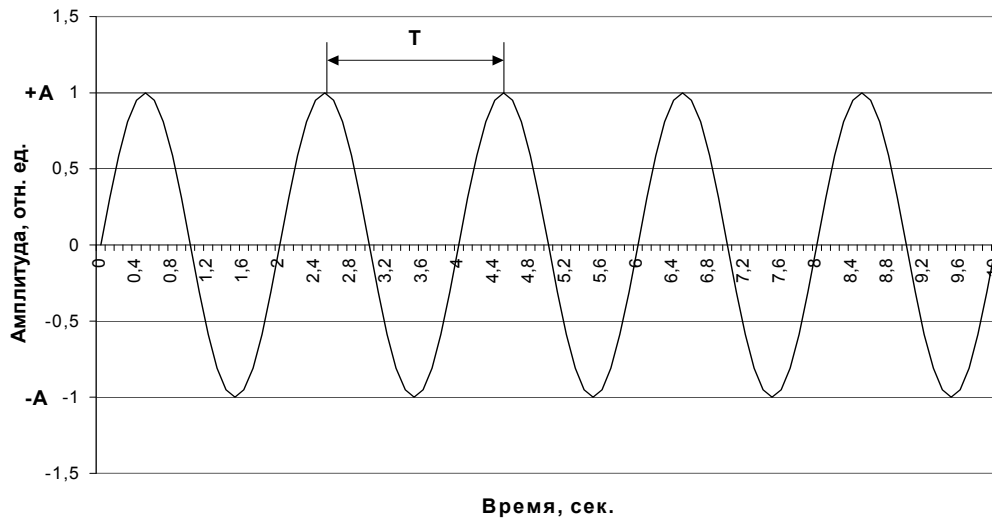
Такое рассмотрение внутренней структуры вещества позволяет подойти к еще одному очень важному механическому понятию – понятию *механических колебаний* в системе. Рассмотрим систему из трех масс  $m$ , закрепленных между двух опор с помощью двух упругих связей как показано на рис. 1.4:



**Рис. 1.4.** Образование продольных (слева) и поперечных (справа) колебаний.

За счет тепловой энергии молекул или каких-либо других процессов центральная масса в такой системе масс и упругих связей имеет возможность смещаться от своего положения равновесия влево и вправо, как показано на рис. 1.4 слева, а также вверх-вниз, как показано на этом рисунке справа. Такие смещения, происходящие во времени с той или иной степенью повторяемости (регулярно), называются механическими колебаниями. При этом левая часть рисунка показывает *продольные колебания* массы в системе, а правая часть рисунка – *поперечные колебания*. Максимальное смещение массы « $m$ » от своего положения равновесия, обозначенное на рисунке  $+A$  или  $-A$ , называется *амплитудой колебаний*. График изменения амплитуды колебаний во времени может в общем случае принимать самые разнообразные формы, однако при решении модельных задач в физике, как правило, рассматривают так называемые *гармонические*

колебания – изменение амплитуды колебаний во времени по закону синуса или косинуса (Рис. 1.5).



**Рис.1.5.** График амплитуды гармонических колебаний.

Относительные единицы (отн. ед.) для обозначения амплитуды колебаний по *шкале ординат* (шкале «у») означают то, что максимальная амплитуда колебаний выбрана равной:  $A=1$ . По *шкале абсцисс* (шкале «х») отложено время в секундах. По этому графику в любой момент времени можно определить относительное (относительно  $A$ ) отклонение массы « $m$ » при колебаниях в ту или иную сторону от положения равновесия. Временной интервал на графике между двумя соседними максимальными отклонениями (или между любыми двумя ближайшими, равными друг другу значениями амплитуды), обозначенный буквой  $T$ , называется *периодом колебаний*. Он измеряется, как и время, в секундах. Величина, обратная периоду:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1.10)$$

называется *частотой колебаний*. Она измеряется в «герцах»<sup>15</sup> (Гц). Т.к. для приведенного графика  $T=2$  секунды, частота этих изображенных колебаний равна  $\nu=0.5$  Гц (т.е. одно колебание происходит 1 раз в 2 секунды). Иногда при расчетах и написании формул удобно пользоваться не частотой  $\nu$ , а так называемой *круговой частотой*  $\omega$  с размерностью «радиан/с»:

$$\omega = 2\pi\nu \quad (1.11)$$

В этом случае полное уравнение показанных на рис. 1.5 колебаний будет иметь вид:

$$a = A \cdot \sin(\omega t + \phi), \quad (1.12)$$

<sup>15</sup> В честь великого немецкого физика **Генриха Герца** (1857-1894), окончательно доказавшего единство световых и электромагнитных волн, работами которого открылся путь к изобретению радиосвязи.

где  $a$  – некое текущее значение амплитуды отклонений в момент времени  $t$ , которое требуется определить;  $\phi$  – начальная *фаза колебаний* (в нашем примере на графике  $\phi=0$  радиан). Все эти понятия в равной степени относятся как к поперечным, так и к продольным колебаниям.

Еще можно заметить, глядя, например, на левую часть рис. 1.4, что при колебаниях частиц в среде, там где пружинка растянута, создается локальное уменьшение плотности среды (разрежение или растяжение). А там где пружинка сжата – локальное увеличение плотности (уплотнение), т.к. *плотность* это и есть *количество масс (частичек) в данном выделенном объеме среды*. Эти периодические продольные колебания плотности среды, распространяющиеся в ней в разных направлениях в виде волн плотности по типу рис. 1.5, называют в физике *звуковыми колебаниями*. Они при определенных частотах (примерно от 16 Гц до 20000Гц) могут регистрироваться органами слуха за счет синхронных колебаний барабанной перепонки уха вместе с колебаниями плотности (давления) воздуха. При частотах ниже 16 Гц говорят об *инфразвуке*, при частотах более 20 кГц – об *ультразвуке* и, даже, при очень высоких частотах (свыше  $10^9$  Гц) – о *гиперзвуке*. Сегодня ультразвук в диапазоне частот от 20 кГц до (примерно) 10 МГц очень широко используется в медицине и с лечебными целями, и в целях диагностики. Диагностическое применение ультразвука основано на том, что ультразвук, как и любая волна в любой среде, подобно волнам на море, может распространяться в биологических тканях с определенной скоростью, зависящей от плотности тканей и особенностей их морфологического строения. Она может, также, отражаться от препятствий (скачков плотности в среде), поглощаться (рассеиваться) в среде и т.п. Все это позволяет, возбуждая и регистрируя ультразвуковые волны в тканях, определять внутреннюю анатомическую и микроструктуру рассматриваемого участка тела человека. Сложение скорости распространяющейся звуковой волны со скоростью распространения крови в крупных сосудах и соответствующее общее изменение частоты регистрируемых колебаний (*эффект Доплера*) позволяет оценивать среднюю скорость кровотока в сосудах и колебания этой скорости, связанные с кардиоритмами и дыхательными физиологическими ритмами организма.

Звуковые (ультразвуковые) колебания, помимо частоты, амплитуды и периода колебаний могут характеризоваться и своей мощностью (интенсивностью), т.е. величиной того звукового давления, которые они могут создавать в среде, а также скоростью его распространения в среде и длиной волны в среде. Мощность, переносимая распространяющейся звуковой волной, пропорциональна произведению квадрата частоты звуковых колебаний в среде на квадрат амплитуды смещения частиц среды. Коэффициент пропорциональности будет зависеть от упругих свойств среды распространения звука (биоткани) и от ее плотности. Не вдаваясь в подробности насчет упругих свойств среды, поскольку они достаточно сложны, отметим, что и скорость распространения звуковой волны в среде также сильно зависит от этих упругих свойств. Поэтому,

плотность мощности звуковой волны (мощность  $W$ , деленную на некоторую площадку  $S$ , через которую проходит волна) практичнее сразу выразить через скорость распространения волны, минуя анализ сложных упругих свойств среды:

$$I = \frac{P^2}{2\rho v}, \quad (1.13)$$

где:  $I$  – плотность мощности звуковой волны ( $\text{Вт/м}^2$ ), которую иногда в акустике называют *интенсивностью* (что, правда, не совсем корректно и несколько запутывает терминологию);  $P$  – давление (Па),  $\rho$  – плотность среды распространения волны ( $\text{кг/м}^3$ ),  $v$  – скорость звуковой волны в среде (м/с). Произведение

$$Z = \rho v \quad (1.14)$$

называется *импедансом среды* – сопротивлением, которое среда оказывает распространяющейся звуковой волне. Это сопротивление зависит как от упругих свойств среды, так и от частоты колебаний звуковой волны, т.е. характеризует определенную инертность среды для распространяющегося в ней звука. Для разных частот импеданс среды может быть разным, поэтому звуковые колебания разных частот затухают в биотканях по-разному. В среднем, уменьшение мощности звуковых колебаний в 10 раз для разных частот колебаний и разных типов биотканей происходит на расстояниях от источника звука в пределах от 5 до 10-15 см.

Не составляет труда теперь, используя уравнения (1.13)-(1.14), подсчитать некоторые типовые значения плотностей мощности звуковой волны, звукового давления и импеданса среды для некоторых практически важных случаев. Так, скорость звука в воздухе составляет порядка 343 м/с. При плотности воздуха около  $1.3 \text{ кг/м}^3$  импеданс воздуха будет равен  $4.5 \cdot 10^2 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{сек)}$ . При плотности мощности звука в  $1 \text{ Вт/м}^2$  создаваемое в воздухе звуковое давление будет равно порядка 30 Па. В воде, за счет ее большей, чем у воздуха, плотности скорость распространения звуковой волны выше. Она составляет около 1500 м/с. Поскольку средняя плотность мягких биологических тканей близка к плотности воды (вода, как известно, является основным наполнителем всех наших мягких тканей), то это значение плотности можно принять и при оценочных расчетах распространения звука в биологических тканях. Плотность воды около  $10^3 \text{ кг/м}^3$ . Соответственно, создаваемое звуковое давление при той же плотности мощности звуковой волны в биотканях будет равно порядка  $1.7 \cdot 10^3 \text{ Па}$  (сравните с величиной атмосферного давления). Поэтому в лечебных целях при ультразвуковой терапии обычно используют более высокие плотности мощности – до  $(0.2 \div 1) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$  ( $0.2 \div 1 \text{ Вт/см}^2$ ), что позволяет создавать локальные звуковые давления, соизмеримые с атмосферным давлением воздуха, или несколько выше.

Более часто в физике при оценке интенсивности (мощности) звука используют не выражение (1.13), а десятичный логарифм отношения звукового давления в среде, создающегося в результате распространения звуковой волны от источника, и некоторого порогового давления, соответствующего порогу слышимости уха среднего нормального человека на частоте  $\nu=1000$  Гц. Это отношение измеряется в «децибелах» (дБ), а само количество децибел  $L$  можно, соответственно, получить из формулы:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0} , \quad (1.15)$$

где  $P$  – создаваемое звуковое давление в среде,  $P_0$  – пороговое значение звукового давления, равное примерно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. Таким образом, уровень звукового давления в 20 дБ означает звуковое давление, в 10 раз большее, чем порог слышимости уха; 40 дБ – в 100 раз и т.д. Обычная домашняя обстановка и нормальный разговор создают уровни звукового давления 40-60 дБ. Шум городской улицы, поезд метро – от 60 до 100 дБ. Болевые ощущения возникают при уровнях шума от 120 дБ и выше, что примерно соответствует гулу взлетающего реактивного самолета. В физиотерапии же нормой считаются уровни воздействия 60-80 дБ.

И последнее, важное понятие из механики и теории колебаний – понятие *длины волны* колебаний. На рис. 1.5 был приведен график амплитуды гармонических колебаний массы  $m$  как функции времени. Если же колебания распространяются в среде в виде бегущих волн, по аналогии с волнами на поверхности воды, то подобный график можно представить и как функцию амплитуды колебаний в зависимости от пространственных координат. Т.е. по оси абсцисс (оси «х») можно отложить не время, а какую-либо пространственную координату. В этом случае расстояние между двумя соседними максимумами (гребнями) на таком графике будет представлять собой уже не период колебаний  $T$ , а *длину волны*  $\lambda$ . Математически длину волны проще всего вычислять через скорость распространения волн в среде:

$$\lambda = \nu \cdot T = \frac{\nu}{\nu} . \quad (1.16)$$

Длина волны измеряется в системе СИ в метрах (сантиметрах, миллиметрах и т.д.). Для звуковых колебаний в воздухе ( $\nu \approx 343$  м/с) длины волн лежат в диапазоне от 1.7 сантиметра для частот в 20 кГц до 21 метра для частот порядка 16 Гц (длина волны колебаний увеличивается с уменьшением частоты колебаний). Важно понимать, что, поскольку скорость распространения звуковой волны в разных средах различна за счет разницы в механических (упругих) свойствах сред, то и длина волны при переходе звука из одной среды в другую будет меняться вместе с ее скоростью. Ультразвуковые (УЗ) колебания в тканях человека имеют другие длины волн, нежели звуковые колебания в воздухе. Так для УЗ частоты  $\nu=880$  кГц длина волны УЗ колебаний в

крови ( $v \approx 1500$  м/с) будет составлять всего порядка  $\lambda = 1.7$  миллиметра (!). А для УЗ частоты  $\nu = 1.2$  МГц – порядка 1.25 мм. Т.е. длина волны любых по природе колебаний в системе не является величиной постоянной (константой). Постоянной величиной для каждого конкретного типа колебаний является, как правило, их частота  $\nu$ .

Более того, каждая масса  $m$  в системе масс и упругих связей, условно показанных на рис.1.3-1.4, обладает своей собственной потенциальной (возможной) частотой колебаний, или, даже, целым *спектром частот* – т.е. набором частот, на которых возможны и наиболее вероятны колебания этих масс в данной системе. Эти частоты называются в физике *собственными частотами колебаний* в системе. От их величины в большой степени зависит, например, скорость распространения волны с определенной частотой в системе. Если же частота колебаний волн источника колебаний совпадает с собственными частотами колебаний в системе, происходит так называемый *резонанс* – сильное увеличение амплитуды колебаний волн в среде. Иногда, например, для строительных конструкций резонансные явления могут быть очень опасны. Они часто служат причиной разрушения конструкций. Однако в быту резонансные явления могут доставлять и приятные минуты. Так, все дети на Земле, не зная сами того, используют явления параметрического резонанса для раскачивания качелей.

Конечно, существующих механических явлений в природе и связанных с ними физических терминов и понятий несоизмеримо больше, нежели рассмотрено выше. Тем не менее, представленного здесь материала, на наш взгляд, вполне достаточно для правильного понимания последующих разделов данного пособия и для применения любых механических факторов в практике физиотерапии. Механические явления и связанные с ними механические факторы воздействия – вибрация, давление, звуковые и УЗ колебания достаточно широко применяются сегодня в медицине, как с лечебными, так и с профилактическими целями. Лечебный массаж, баротерапия, вибротерапия, виброакустическая терапия ( $\nu = 30$  Гц...18 кГц) – вот далеко не полный перечень названия методов применения механических факторов в медицине, известных, естественно, любому практикующему физиотерапевту.

## Глава 2. Факторы статического электричества (электростатика)

---

Прежде всего, напомним, что под словом «статический» понимается в физике и механике «неизменный во времени». Т.е. в данном разделе речь пойдет о неизменном во времени электрическом поле – поле, создаваемом *неподвижными электрическими зарядами*<sup>16</sup>. Разнообразные природные явления, связанные с электрическими зарядами, были известны людям, видимо, с самых древних времен. Однако сведения о них долгое время в литературе были очень отрывисты. Часто им приписывались разные мистические и религиозные черты (вспомните Бога Зевса–Громовержца с его огненными колесницами). Но уже родоначальник древнегреческой философии **Фалес из Милета** (Фалес Милетский, VI в до н.э.) упоминает о свойстве натертого о шерсть янтаря притягивать к себе различные легкие предметы – волосы, пылинки и т.п., т.е. говорит об объективном физическом явлении, открытом, по его словам, древнегреческими ткачами. Позднее, в Средневековье, многочисленные фокусы с натертыми янтарными (волшебными) палочками часто использовались служителями церкви в своих религиозных целях. Научное же изучение электричества началось только в XVI-XVII веках с работ **У.Гильберта**, уже упоминавшегося нами во введении. Ему удалось экспериментально установить, что при механическом натирании не только янтарь, но и ряд других веществ и камней начинают притягивать к себе легкие предметы. В частности, такими веществами оказались стекло, сера и смола. Гильберт все их назвал «*электрическими*», т.е. подобными янтарю. Так в науку вошел термин «электричество», произведенный от греческого названия янтаря: по-гречески янтарь – «электрон».

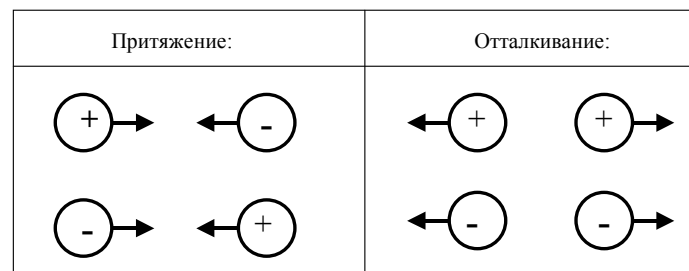
Первую стройную теорию электрических зарядов создал французский естествоиспытатель **Шарль Дюфе** (1698-1739). Он присвоил термины «стеклянное» и «смоляное» электричество разным по свойствам зарядам, установил факт притяжения разноименных и отталкивания одноименных зарядов и опубликовал об этом статью в Мемуарах Парижской Академии Наук в 1733г. Несколько позже **Бенджамин Франклин**<sup>17</sup>, исходя из ряда частных соображений, назвал

---

<sup>16</sup> Если заряды хоть в малейшей степени начинают двигаться, то это уже предмет изучения следующих разделов физики – разделов о постоянном и переменном электрическом токе.

<sup>17</sup> **Вениамин (Бенджамин) Франклин** (1706-1790) считается основоположником Американской науки и одним из основателей всех Соединенных Штатов Америки в целом. При его непосредственном участии была выработана Декларация Независимости и написана конституция США, а в 1783г. он вместе с двумя другими уполномоченными Конгресса США подписал мирный договор с Англией. Среди научных трудов В.Франклина первое место занимают его исследования по статическому электричеству. Именно ему принадлежит идея рассматривать удар молнии как электрический разряд и идея конструкции «колеса Франклина» - эффективного электростатического генератора, который широко распространен и поныне в школьных кабинетах физики для демонстрации опытов с электрическими зарядами. В физиотерапии его имя носит одна из процедур применения факторов статического электричества – процедура франклинизации.

эти виды зарядов «положительными» и «отрицательными» соответственно, что и используется сегодня повсеместно в терминологии современной физики. Однако надо отдельно и специально отметить, а также всегда помнить, что никакого однозначного и полного определения в физике, что такое *электрический заряд*, сегодня не существует. Это некое элементарное понятие. Это просто некое *свойство тел*, которое они могут приобретать, терять или иметь постоянно, как, например, электрон или протон. Это свойство дает возможность телам и частицам взаимодействовать между собой на расстоянии определенным образом (притягиваться или отталкиваться). И более ничего. Совершенно ничего. *Одноименные заряды отталкиваются друг от друга, а разноименные притягиваются*. Это просто известно из опыта. Вместо названий зарядов «положительный» и «отрицательный» можно было бы и по сей день с успехом использовать термины «стеклянный» и «смоляной», «черный» и «белый» или еще что-нибудь<sup>18</sup>. Суть от этого и физический смысл явлений не изменились бы. Но, так сложилось исторически, что в физике устоялись для зарядов термины «положительный» и «отрицательный». Это удобно для выполнения поясняющих рисунков – разные заряды сегодня просто обозначают на рисунках разными знаками «+» или «-»:



**Рис. 2.1.** Притяжение и отталкивание разных по знакам зарядов.

Другое дело – количественный закон для силы взаимодействия двух зарядов. Этот закон известен в физике как *закон Кулона*<sup>19</sup>, хотя первым его экспериментально установил в 1771г. богатый английский лорд **Генри Кавендиш** (1731-1810), занимавшийся физикой и химией на свои деньги в качестве развлечения (хобби). А мысли, что этот закон должен быть аналогичен закону тяготения Ньютона, т.е. что сила взаимодействия двух заряженных тел должна меняться обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, высказывались и того раньше – в 1759г. петербургским академиком немецкого происхождения **Францем Эпинусом** (1724-1802), а в 1767г. немецким естествоиспытателем и философом **Джозефом Пристли**. Кавендиш, одна-

<sup>18</sup> Например, в физике элементарных частиц новые открываемые физические свойства частиц носят весьма поэтические названия: «барионный заряд», «странность», «очарование» и т.п.

<sup>19</sup> **Шарль Огюстен Кулон** (1736-1806) – французский ученый-физик и военный инженер.



ко, не опубликовал своей работы, и Кулон, видимо, не был с ней знаком, а открыл этот закон самостоятельно и не зависимо от Кавендиша.

Для определения силы взаимодействия между двумя электрическими зарядами Кулон построил специальный прибор – крутильные весы. Сила на нем измерялась механическим способом по углу закручивания упругой нити и необходимому для этого *моменту механической силы* – произведению модуля действующей силы на плечо действия силы. С помощью этого прибора Кулон в 1785г. и установил, что два *точечных* электрических заряда  $q_1$  и  $q_2$ , т.е. заряженных тела, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между телами, взаимодействуют между собой с силой  $F_e$ , модуль которой определяется выражением:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}, \quad (2.1)$$

где  $R$  – расстояние между центрами заряженных тел,  $q_1$  и  $q_2$  – заряды этих тел,  $\epsilon_0$  – *диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная)*, равная  $8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\epsilon$  – безразмерная величина *относительной диэлектрической проницаемости среды*, в которой находятся заряженные тела. Она показывает во сколько раз сила взаимодействия двух зарядов в данной среде меньше, чем их сила взаимодействия в вакууме.

В этом выражении всю первую дробь можно было бы обозначить как одну константу, и тогда (2.1) в точности напоминало бы выражение для закона тяготения Ньютона (см. формулу 1.2), что весьма забавно, но пока полного объяснения в современной теоретической физике и теории поля не имеет. Сила  $F_e$  по (2.1) направлена вдоль прямой, соединяющей центры зарядов. Говорят, что эта сила, как и сила тяготения, *центральная* (направлена к центру взаимодействующих тел). Знак же модуля силы или конкретное направление силы как вектора определяют знаки зарядов. При одинаковых знаках зарядов сила положительна, что означает отталкивание, а при разных – отрицательна, что означает притяжение.

Отдельно надо остановиться на величине размерности зарядов в физике. Выражение (2.1) в системе СИ определяет заряды через единицы измерения механической силы (Н), расстояния (м) и единицу измерения электрической постоянной  $\epsilon_0$  (о ней чуть позже). Это очень неудобно. Поэтому для единицы измерения заряда было введено специальное название – «кулон» (Кл), в честь, естественно, автора обсуждаемого закона. Величина «одного кулона» определялась исторически, правда, не из закона Кулона, а из других соображений, поэтому закон Кулона в современной формулировке в системе СИ и выглядит в форме выражения (2.1), а не какого-либо другого. Т.е. заряды в формуле (2.1) измеряются именно в кулонах, а величина 1Кл была подобрана (выбрана) так, что два заряда в 1Кл на расстоянии 1м в вакууме взаимодействуют с силой, примерно  $9 \cdot 10^9$  н. Много это, или мало? Достаточно сравнить, что человек массой в 100кг притяги-

вается к Земле, согласно формуле (1.3), с силой всего примерно  $10^3\text{Н}$ . Так что силу, равную взаимодействию двух зарядов в 1Кл, почувствует от гравитации лишь человек на поверхности Земли, если он будет обладать массой около одного миллиона тонн! Это – огромная сила!

Таким образом, электрические заряды – очень мощные источники силовых взаимодействий. Электрические взаимодействия в тысячи и миллионы раз сильнее гравитационных, если условно сравнивать «кулоны» и «килограммы». К счастью эти взаимодействия настолько велики, что создать в природе большие электрические заряды для сравнительно небольших по размерам тел практически невозможно. Отталкиваясь друг от друга с большой силой, заряды практически не могут удержаться на одном теле близко друг к другу и постоянно «слетают» с него в окружающее пространство. На этом явлении построены, например, так называемые «люстры Чижевского». В них искусственно большие одноименные заряды создаются на очень острых кончиках игл, т.е. на очень крохотном по размеру теле. За счет электрических сил отталкивания они сразу слетают с игл в воздух, попутно ионизируя его.

Электрические силы притяжения и отталкивания играют очень большую, если не основополагающую роль в природе и строении всех макроскопических, да и микроскопических тел. Они же ответственны, как это ни странно, и за многие «механические» явления. Сегодня любому человеку, обучавшемуся в школе, не надо объяснять, что ряд элементарных частиц, составляющих основу всех атомов, например протоны и электроны, обладают электрическим зарядом. Причем для протона и электрона этот заряд считается минимально возможным в природе, т.е. *элементарным*, и равен он примерно  $1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Однако у электрона и протона он разных знаков. Для электрона знак заряда принят отрицательным (т.к. янтарь – тоже вид смолы) а для протона – положительным. Но оба эти заряда в точности равны друг другу. Поэтому полный электрический заряд любого тела всегда будет кратным этой величине – заряду электрона, т.к. суммарный электрический заряд тела равен арифметической сумме всех его внутренних зарядов с учетом их знака. Говорят в связи с этим, что электрический заряд в природе *дискретен* или *квантован*.

Именно электрические силы притяжения удерживают отрицательно заряженные электроны на орбитах вокруг положительно заряженного ядра в атоме (ядро в атоме содержит положительно заряженные протоны, общим количеством, как правило, равным количеству электронов в атоме<sup>20</sup>). Электрическое же отталкивание внешних электронных оболочек двух соседних ато-

---

<sup>20</sup> Внимательный читатель здесь может задать вопрос, как же одноименно заряженные протоны сами удерживаются внутри такого маленького образования, как атомное ядро, и не разлетаются из него в разные стороны за счет огромных кулоновских сил отталкивания, подобно электронам на кончиках игл люстры Чижевского? Вопрос совершенно справедливый! Просто в атоме есть противодействующие кулоновским силам ядерные силы притяжения. Пока протонов в ядре мало, эти силы вполне компенсируют силы отталкивания. Но для элементов с большими атомными номерами, т.е. с большим числом про-

мов определяет, в большой степени, природу упругих «механических» сил отталкивания молекул и атомов внутри макроскопических тел, что в разделе 2 нами было условно представлено на рисунках в виде упругих пружинок. Это же отталкивание не дает двум макроскопическим телам «проникнуть» друг в друга.

В целом же, подавляющее большинство всех макроскопических тел в природе электрически нейтрально (не обладает сколько-нибудь существенным суммарным электрическим зарядом по сравнению с размерами тела), т.к. все тела состоят из очень большого количества электронов и протонов, и их суммарный заряд за счет разных знаков зарядов протонов и электронов практически полностью компенсируется (равен нулю). Наша планета Земля, например, суммарно *заряжена отрицательно* с общим зарядом в  $6 \cdot 10^5$  Кл. Казалось бы – огромный заряд! Но и размеры Земли огромны. Объем Земного шара равен примерно  $10^{21}$  м<sup>3</sup>. Следовательно, на 1 м<sup>3</sup> Земли приходится заряд не более  $6 \cdot 10^{-16}$  Кл.

Векторное (с учетом направления) силовое электростатическое воздействие одного заряженного тела на другое на практике удобно характеризовать не только с помощью понятия кулоновских сил, но с помощью такого понятия, как *вектор напряженности электрического поля*. Этот вектор определяется через вектор кулоновской силы и величину заряда  $q_1$ , на который действует эта сила за счет наличия где-то в пространстве на расстоянии  $R$  другого заряда  $q_2$ :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_1}, \quad (2.2)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля, которое создается зарядом  $q_2$  и действует на рассматриваемый нами заряд  $q_1$ . Модуль вектора  $\mathbf{E}$  определяется, таким образом, из закона Кулона и легко может быть при необходимости вычислен по формуле:

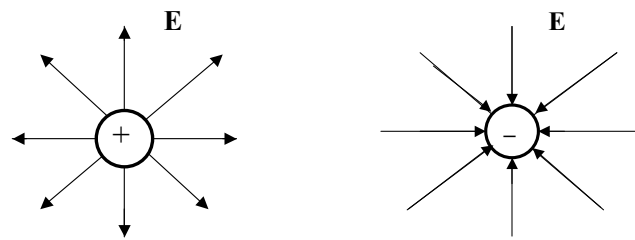
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_2}{R^2}. \quad (2.3)$$

Напряженность электрического поля  $E$  (не путайте с обозначением энергии – к сожалению букв в латинском алфавите много меньше существующих ныне физических терминов) измеряется согласно формуле (2.2) в «ньютон/кулон» (Н/Кл), или, что тоже самое (как это будет показано ниже), в «вольтах/метр» (В/м) и характеризует некий *потенциал* поля заряда  $q_2$  воздействовать на заряд  $q_1$ .

---

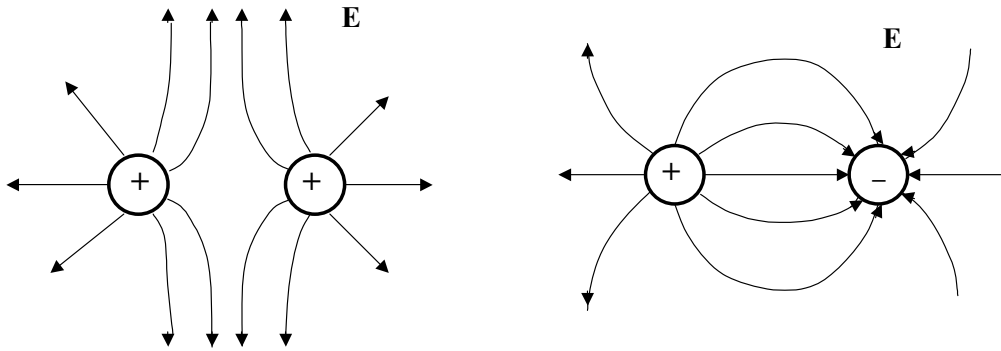
тонов в ядре (для урана, например, их 92), компенсация не всегда оказывается удачной. Часто такие ядра самопроизвольно распадаются со временем (явление радиоактивности). Если же такое ядро дополнительно «встрясти», например, попаданием в него нейтрона, ядро полностью начнет распадаться по цепной реакции – реакции ядерного взрыва. Так что ядерный взрыв – это, по сути, взрыв электрический, обусловленный, как раз, нестабильностью ядер за счет кулоновских сил отталкивания между протонами.

Введение этой величины удобно тем, что, во-первых, она, как и сила  $F_e$ , величина векторная, т.е. характеризует направление взаимодействия зарядов, а, во-вторых, она удельная по отношению к величине рассматриваемого заряда  $q_1$ , т.е. не зависит от его абсолютной величины, а характеризует только силовое поле, создаваемое в пространстве внешним зарядом  $q_2$ . Это силовое поле можно изображать графически на рисунках в виде *силовых линий* электростатического поля. Направление этих линий в какой-либо точке пространства будет указывать на направление действующей кулоновской силы в этой точке пространства, а плотность этих линий – на величину (модуль) действующей силы. При этом, для положительных зарядов по определению силовые линии  $E$  направлены от заряда во внешнее пространство, а для отрицательных, наоборот, из пространства к заряду. Так, например, одиночные положительные и отрицательные заряды создают вокруг себя центральное равномерное электростатическое поле, показанное на рис. 2.2. Наша Земля, например, за счет ее общего отрицательного электростатического заряда создает напряженность электростатического поля у поверхности планеты примерно в 136 В/м по типу правой части рис. 2.2.



**Рис. 2.2.** Силовые линии поля одиночных электрических зарядов.

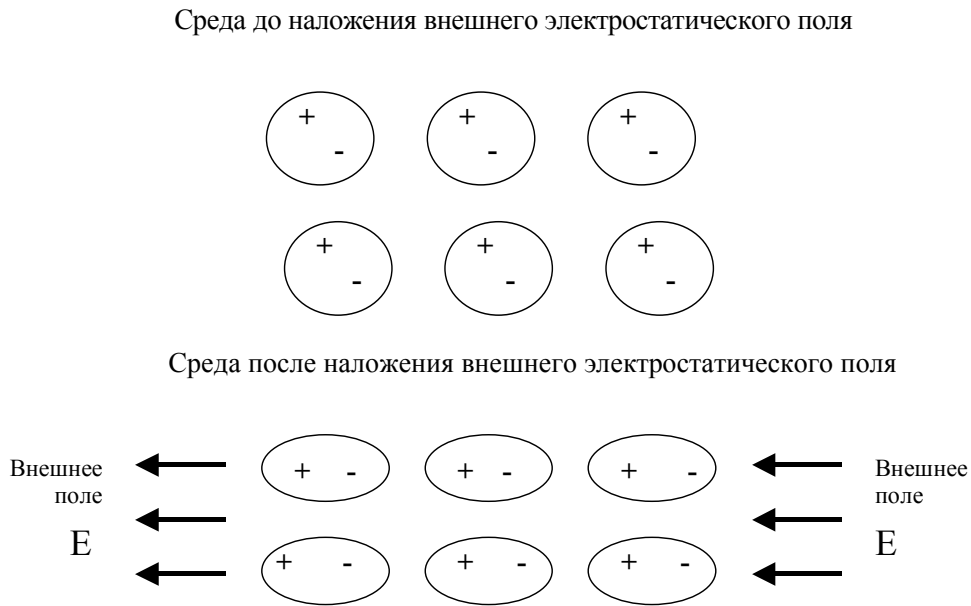
Однако, поскольку, величина  $E$  – векторная, то при наличии в пространстве одновременно нескольких зарядов напряженности их полей складываются согласно закону сложения векторных величин. Это приводит к различным конфигурациям силовых линий суммарного электрического поля, глядя на которые можно понять, что будет происходить с тем или иным пробным зарядом, попавшим в это поле. Эти же рисунки силовых линий для двух одноименных и разноименных зарядов позволяют лучше и нагляднее понять, почему одноименные заряды отталкиваются друг от друга, а разноименные притягиваются (см. рис.2.3).



**Рис. 2.3.** Силовые линии электростатического поля двух одноименных и разноименных зарядов.

Электрическое поле, создаваемое заряженными телами, оказывает существенное влияние на всю внешнюю материальную среду, в которой оно создается или которую оно пронизывает, т.к. атомы и молекулы любой внешней материальной среды (за исключением вакуума) содержат свои внутренние разноименные заряды (отрицательно заряженные электроны на электронных орбиталях и положительно заряженные протоны в ядрах атомов). Все заряды удерживаются внутри среды внутренними упругими электрическими силами притяжения и отталкивания. В отсутствие внешнего поля эти заряды в среде, как мы уже говорили, практически полностью уравновешены, и внутри среды нет ярко выраженных полюсов положительных и отрицательных зарядов. При наложении же на среду внешнего электростатического поля внутренние заряды за счет появившихся дополнительных (внешних) кулоновских сил притяжения и отталкивания начнут ориентироваться и притягиваться каждый к своему полюсу. Это приведет, если можно так упрощенно себе представить, к некоторому «растяжению» молекул и атомов, которые первоначально были компактны и электрически нейтральны, а также к их переориентации внутри среды, если упругие свойства среды это позволяют. Как следствие, все молекулы и атомы приобретут за счет внешнего электрического поля определенные и достаточно выраженные собственные электрические полюса. В этом случае говорят, что среда начинает поляризоваться, т.е. возникает *электростатическая поляризация среды*<sup>21</sup>. Наглядно это явление легко можно себе представить, взглянув на рис.2.4.

<sup>21</sup> К сожалению, в современной физике есть некоторые термины, которые многозначны, т.е. используются в разных ситуациях и разделах физики с несколько различающимся смысловым значением. К таким многозначным терминам как раз и относится введенный здесь термин «поляризация». Будьте внимательны. Не путайте, например, поляризацию света (волны) и поляризацию среды распространения электромагнитной волны. В данном случае под поляризацией среды понимается процесс деформации и ориентации молекул и атомов под действием приложенного внешнего электростатического поля.



**Рис. 2.4.** Поляризация среды под действием внешнего электростатического поля.

Более того, образование в среде полярных молекул дополнительно приводит к усилению электростатического поля в среде, т.к. суммарное поле в среде будет уже представлять собой сумму первоначально приложенного внешнего поля  $\mathbf{E}$  и электрического поля, образуемого собственными поляризованными элементами среды. Это явление носит название *электрической индукции*. Характеризуется электрическая индукция в физике соответствующим вектором электрической индукции  $\mathbf{D}$ <sup>22</sup>:

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E} . \quad (2.4)$$

Однако на практике физиотерапевтам очень редко приходится иметь дело с вектором  $\mathbf{D}$ , поэтому можно подробно на нем не останавливаться. Подчеркнем, только, еще раз, что речь сейчас идет исключительно о неподвижных элементах среды и любых зарядах, которые не могут свободно перемещаться в пространстве за счет кулоновских взаимодействий. Заряды могут только немного колебаться или менять ориентацию вокруг своего положения равновесия, ибо любые подвижные заряды в среде образуют уже электрический ток, т.е. некое динамическое явление. А мы пока рассматриваем лишь электростатические взаимодействия.

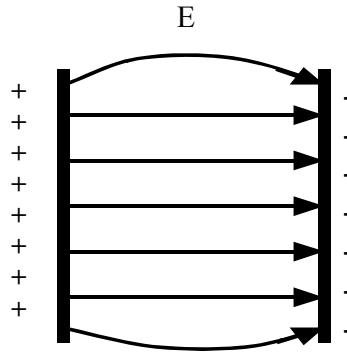
<sup>22</sup> В ряде руководств по физике это явление и соответствующий вектор  $\mathbf{D}$  называют также «электрическим смещением». Это связано с тем, что многие диэлектрики, рассматриваемые в физике, являются твердыми телами, содержащими внутренние микрополости и трещины, в которых могут накапливаться свободные заряды. При приложении внешнего поля эти заряды начинают притягиваться к вновь появившемуся полюсам, давить на стенки полостей и трещин, что в упругой среде приводит к некоторому смещению внутренних неоднородностей диэлектрика от их первоначального положения и общей деформации диэлектрика (*явление электрострикции*).

Важнее сейчас заострить внимание на собственно электрических (точнее электростатических) свойствах среды. Понятно, что все материальные среды, включая биологические, весьма различны по своим физическим свойствам. Различаются они и по способности к электростатической поляризации. В целом, эти свойства в электростатике описываются параметром  $\varepsilon$ , входящим во все уравнения (2.1)-(2.4), т.е. любая среда характеризуется с точки зрения электростатики своей особой относительной (относительно вакуума) *диэлектрической проницаемостью*  $\varepsilon$ . Для вакуума  $\varepsilon=1$ . Для любых других сред в подавляющем большинстве случаев  $\varepsilon>1$ . Это приводит к тому, что, согласно формуле (2.3), один и тот же заряд  $q_2$  в среде создаст напряженность поля, в общем случае меньшую по своей абсолютной величине, чем в вакууме. Т.е. электрическое поле при переходе из вакуума в среду, вообще говоря, уменьшается. Частично это уменьшение компенсируется явлением электрической индукции, но, как правило, далеко не полностью. Для разных биологических тканей и электростатических полей типовые значения  $\varepsilon$  лежат в диапазоне  $10^3$ - $10^6$  относительных единиц (отн. ед.)<sup>23</sup>. Это означает, что биологические ткани могут весьма существенно уменьшать величину напряженности электростатического поля по сравнению с вакуумом. Именно поэтому при процедурах франклинизации, в которых используют в качестве действующего физического фактора электростатическое поле, напряженности поля, создаваемые аппаратурой, должны быть достаточно большими – до 30-100 киловольт на метр (кВ/м). Только при таких значениях внешнего поля напряженность поля внутри тела человека будет значительно отличаться от фоновой напряженности поля, создаваемого нашей заряженной планетой, и сможет достигать значений в 30-100 милливольт на метр (мВ/м), что уже вполне достаточно для поляризации плазмолеммы и ориентации разнообразных дипольных биологических молекул.

Для создания однородных в пространстве электростатических полей, подобно полю, изображенному на рис. 2.4 (сравните с рис. 2.3), необходимо, естественно, оперировать не виртуальными точечными электрическими зарядами, а какими-либо реальными техническими устройствами, позволяющими создавать такие поля. Простейшим примером такого устройства является система, состоящая из двух разноименно заряженных металлических пластин (Рис.2.5). Поле между ними в центре пластин будет практически однородно, т.е. плотность силовых линий между пластинами постоянна. Направлено же поле будет перпендикулярно плоскости пластин. И лишь у самых границ пластин за счет так называемых «краевых эффектов» конфигурация поля в пространстве будет несколько искривлена.

---

<sup>23</sup> Для динамических электромагнитных полей величина  $\varepsilon$  имеет еще и существенную зависимость от частоты изменения поля (см. главы 5-6).



**Рис. 2.5.** Электрическое поле между двумя заряженными пластинами.

Такое устройство в физике и технике при достаточно близком расположении пластин называется *конденсатором*. Конденсаторы очень удобны для накопления больших зарядов. Они характеризуются своей емкостью «С», которая измеряется в системе СИ в *фарадах* (Ф). Между емкостью и зарядом существует определенная зависимость, именно поэтому электрическая постоянная  $\epsilon_0$  (диэлектрическая проницаемость вакуума) в формулах (2.1) и (2.3) имеет размерность «фарада/метр» (Ф/м). И зависимость эта очень важна для понимания физики электростатических процессов, да и последующих разделов по электрическому току, поэтому, завершая наш раздел по электростатике, мы остановимся на краткой характеристике физических величин и явлений, ее определяющих.

Потенциальная энергия электростатического поля определяется, как и в ряде задач механики (см. главу 1), через работу по перемещению пробного электрического заряда из одного пространственного положения (например, из бесконечности) в другое (конечное) под действием кулоновской силы. Поскольку электростатическое поле, как и гравитационное, *консервативно*, т.е. работа не зависит от пути, по которому она совершалась, при условии нулевой потенциальной энергии на бесконечности потенциальная энергия электростатического поля, созданного точечным зарядом, может быть вычислена в простейшем случае через работу простым умножением модуля кулоновской силы  $F_e$  на путь  $R$ :

$$E_n = F_e \cdot R, \quad \text{или} \quad (2.5)$$

$$E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R}$$

где:  $E_n$  – потенциальная энергия одного заряда, например  $q_1$ , находящегося в поле другого заряда –  $q_2$  (не путайте символ потенциальной энергии  $E_n$  с вектором напряженности  $\mathbf{E}$  и модулем вектора напряженности  $E=|\mathbf{E}|$ . Отличие здесь в индексе «п», введенном нами в главе 1, что в данном случае говорит об обозначении величины потенциальной энергии поля).



Соответственно, можно говорить, что любая пространственная точка в поле электростатических сил с энергией поля  $E_n$  обладает неким *потенциалом* действия на вносимый в поле пробный заряд  $q$ . Это еще одно фундаментальное понятие в физике. *Электрический потенциал* по определению – это потенциальная энергия поля, деленная на заряд вносимой в поле пробной заряженной частицы<sup>24</sup>. Обозначается он обычно буквой  $\varphi$ . Т.е. по определению электрический потенциал равен:

$$\varphi = \frac{E_n}{q} . \quad (2.6)$$

Размерность величины потенциала согласно (2.6) определяется как «энергия/заряд», т.е. Дж/Кл. В системе СИ эта величина носит особое название – *вольт* (1В=1Дж/1Кл) в честь известного итальянского физика **Алессандро Вольты**<sup>25</sup>. Именно поэтому, кстати, вектор напряженности электростатического поля  $E$  удобнее и давно принято в системе СИ выражать в размерности «вольт/метр», а не «ньютон/кулон». Действительно, в случае потенциала, линейно изменяющегося с расстоянием, (2.6) с учетом (2.5) и (2.2) можно переписать в виде:

$$\varphi = \frac{F_e \cdot R}{q} = E \cdot R .$$

Откуда легко получить выражение для модуля напряженности поля:

$$E = \varphi / R ,$$

что и дает размерность напряженности поля в «вольт/метр». При этом работа по перемещению пробного электрического заряда  $q$  из точки пространства с потенциалом  $\varphi_1$  в точку пространства с потенциалом  $\varphi_2$  запишется в виде:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) .$$

Поскольку любая пространственная точка поля  $x_i$  обладает своим потенциалом  $\varphi_i$ , между двумя любыми точками поля  $x_1$  и  $x_2$  можно вычислить *разность потенциалов*:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 . \quad (2.7)$$

Эта разность потенциалов  $U$  также, естественно, измеряется в вольтах (В), но носит в физике специальное и всем известное название – *напряжение*. Таким образом, в консервативном поле электростатических сил между любыми двумя пространственными точками всегда суще-

<sup>24</sup> Как правило, рассматривается вносимый положительный единичный пробный заряд.

<sup>25</sup> **Алессандро Вольты** (1745-1827) – известный итальянский физик, последователь и первоначально приверженец физиологических идей Луиджи Гальвани. В 1800г. построил первый генератор электрического тока (*гальванический элемент*) – вольтов столб, за что получил всемирную славу. Будучи физиком-профессионалом, сумел обосновать чисто физическую природу действия тока на сократительный аппарат мышц, т.е. фактически исключил физиологическую терминологию Гальвани (см. главу 3) из этого физического явления, что и обеспечило последующее быстрое и плодотворное развитие физической науки об электричестве, как о чисто физическом процессе.

ствует электрическое напряжение. Оно играет фундаментальную роль при рассмотрении любых явлений, связанных с электрическим током. Это же напряжение «существует» в электрических розетках наших домов, в батарейках наручных часов и т.д. Но, фактически, как теперь должно быть понятно, электрическое напряжение – это разность электрических потенциалов поля между двумя любыми пространственными точками электрического поля (например, между двумя контактами в розетке).

Формулы (2.3), (2.6) и (2.7) позволяют теперь легко установить дополнительные связи между разными понятиями и величинами электростатики. Например, можно вывести однозначную связь между электрическим зарядом и напряжением. Связь эта может быть записана через разные величины, но наиболее целесообразно с точки зрения практики записать и запомнить ее в следующем виде:

$$q = C \cdot U, \quad (2.8)$$

где:  $C$  – *емкость* конденсатора. Таким образом, емкость конденсатора фактически является простым коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей заряд и напряжение на пластинах конденсатора. Более строго в физике эта емкость называется *взаимной электроемкостью* двух заряженных тел (проводников), но в практической электротехнике и электронике она сегодня часто упрощенно называется просто емкостью. Дело в том, что емкостью может обладать и любой отдельно взятый проводник, любое заряженное тело, например, шар. В этом случае его емкость определяется аналогично формуле (2.8), но вместо напряжения в уравнении используется просто значение одного потенциала поля, создаваемого этим шаром (проводником), а не разности потенциалов. В практически же используемых случаях, как правило, всегда рассматривается система тел и проводников, поэтому вычисление истинной (единичной) емкости тела – удел сегодня лишь учебных задач по физике.

## Глава 3. Постоянный электрический ток

---

*Электрическим током* в физике по определению называется *любое упорядоченное движение зарядов*. По современным представлениям двигаться в среде могут любые нескомпенсированные заряды – свободные электроны, ионы<sup>26</sup> атомов и молекул и т.п. В сущности, уже любое пробное перемещение или, даже, смещение от положения равновесия зарядов в электростатике – это уже электрический ток (*ток смещения* или *конвекционный ток*). Поэтому часто электростатику понимают лишь как некий идеализированный случай, в чистом виде никогда не встречающийся на практике. Например, при проведении процедур франклинизации, часто возникают микротоки в воздухе, вызванные движением ионов воздуха<sup>27</sup>.

Изучение действия электрического тока и его законов началось еще в середине XVIII века. В 1729г. англичанин **Стэфен Грэй** (1670-1736), член Лондонского Королевского общества, открыл явление электропроводности и показал, что существуют проводники и изоляторы (диэлектрики), по разному передающие заряды от одного тела к другому. Он установил, что заряды хорошо передаются от тела к телу<sup>28</sup> по металлической проволоке и очень плохо по шелковой нити. При этом часто проскакивают искры между телами, а у испытуемых возникают неприятные ощущения. Однако первым, кто серьезно обратил внимание на физиологическое действие тока, был, видимо, немецкий ученый-физик **Мушенбрук**. В 1745-1746г. во время опытов с изобретенной им Лейденской банкой (по названию города Лейдена, в котором проводились опыты), т.е. с приспособлением для накопления заряда, его буквально стукнуло током. После его сообщения об этом случае в газетах, электричество стали повсеместно использовать в аристократических обществах для развлечений – внезапно ударяли друг друга током и наблюдали разнообразные ответные реакции у партнера. Но после публикации Мушенбрука заинтересовались этим явлением не только праздно живущие члены аристократических клубов, но и многие ученые.

---

<sup>26</sup> Ион – от греческого слова «идущий» - электрически заряженная частица среды, образующаяся при потере или присоединении электронов атомами, молекулами, радикалами и т.п. Соответственно, ионы могут быть как положительными (при потере электрона), так и отрицательными (при присоединении). Ионы могут входить в состав молекул, а также существовать в не связанном состоянии – в газах и жидкостях (растворителях).

<sup>27</sup> В естественных условиях в 1 мл воздуха содержится около 450 пар положительных и отрицательных легких ионов. Загрязнение воздуха приводит к снижению пар ионов в воздухе до 100 и менее. Небольшое и кратковременное увеличение концентрации ионов воздуха до 1-5 тыс. пар ионов оказывает, как правило, благоприятное стимулирующее и лечебное действие на организм (аэроионотерапия). Сильное же увеличение концентрации ионов в воздухе может иметь неблагоприятные последствия для человека.

<sup>28</sup> Как это ни ужасно звучит сегодня, но понятие тела Грэй использовал буквально – наэлектризовывал тела людей и, в частности, в одном из экспериментов – тело маленького живого ребенка, если верить книгам по истории физики.

Одним из них был **Луиджи Гальвани**<sup>29</sup>. Скорое открытие в лаборатории Гальвани в дополнение к статье Мушенбрука так называемого явления гальванизма («животного электричества») привлекло еще большее внимание разных специалистов к этому явлению. Среди физиков таким оказался А.Вольта, который заинтересовался, прежде всего, физической стороной дела и поставил все эксперименты на серьезную физическую основу. Он, в частности, создал, как уже упоминалось, специальный источник напряжения для продолжения экспериментов – «вольтов столб» или «гальванический элемент» (а попросту - обычную батарейку) и показал, что источником электричества являются не физиологические процессы в организме лягушки, а физические процессы, происходящие в батарейке и присоединенных к ней металлических проводниках-пластинах. Вследствие этого Вольта предложил заменить название «животное электричество» на «металлическое электричество». Вскоре стали появляться термины «обыкновенное электричество», «индукционное электричество» и т.п. и разгорелись жаркие дебаты на тему о сути и природе электрического тока. Всем спорам положил конец **Майкл Фарадей**<sup>30</sup>, когда в 1833г. он однозначно установил физическую тождественность всех видов электричества и показал, что отличие в опытах существует лишь в направлении протекания тока и в типах используемых источников тока, его порождающих (химические, индукционные, гальванические и т.п.). К этому времени к исследованиям постоянного тока присоединились уже **Анри Ампер**<sup>31</sup>, **Георг Ом**<sup>32</sup> и многие другие выдающиеся физики, так что появление достаточно полной и стройной теории постоянного электрического тока не заставило себя долго ждать.

---

<sup>29</sup> **Луиджи Гальвани** (1737-1798) изучал сначала богословие, а затем физиологию, анатомию и медицину. С 25 лет работал преподавателем физиологии и медицины в Болонском университете. В его лаборатории (первоначально его помощниками, в частности его супругой, а не им самим) было замечено явление сокращения мышц лягушки под действием электрического тока. Впоследствии это явление с точки зрения физиологии было подробно изучено самим Гальвани и опубликовано как открытие в 1791г., хотя в то время уже существовали труды Мушенбрука и Марата. Однако, будучи профессиональным физиологом, он, в отличие от своих предшественников, сразу приписал этому явлению чисто биологическую природу, назвал его «животным электричеством» и распространил о нем сведения среди профессиональных физиологов и врачей. Именно поэтому, видимо, он среди врачей и считается основоположником физиологии действия электрического тока, и в его честь были названы первые искусственные источники тока для экспериментов – гальванические элементы. Собственно, сам постоянный электрический ток тоже долгое время назывался в медицине и физике гальваническим током.

<sup>30</sup> **Майкл Фарадей** (1791-1867) – английский ученый-физик, самоучка, один из самых талантливых физиков мира. Его труды по электромагнетизму настолько обширны, что даже перечислить все их здесь весьма сложно. Достаточно сказать, что именно его трудами в физику было введено понятие физического силового (в частности, электромагнитного) поля.

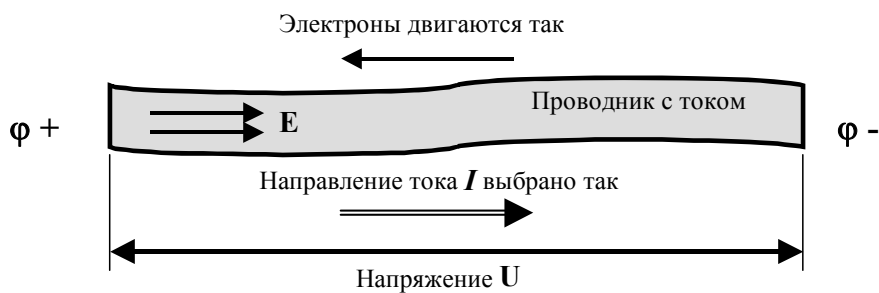
<sup>31</sup> **Андре Мари Ампер** (1775-1836) – французский физик, автор закона механического взаимодействия токов, протекающего по двум параллельным проводникам, один из основоположников современной электродинамики.

<sup>32</sup> **Георг Ом** (1787-1854) – немецкий учитель физики, открывший количественный закон связи тока, напряжения и сопротивления замкнутой цепи (Закон Ома).

Сегодня уже хорошо известно, что электрический ток в проводниках (*ток проводимости*) представляет собой упорядоченное движение свободных зарядов под действием приложенного к проводнику электрического поля. Для металлических проводников свободными зарядами являются обобществленные валентные электроны внешних электронных оболочек атомов, способные к упорядоченному движению во внешнем электрическом поле. Силовой характеристикой электрического тока является *сила тока*<sup>33</sup> – скалярная величина, определяемая как количество протекаемого заряда через рассматриваемое сечение проводника в единичный интервал времени. Так, если в момент времени  $t_1$  имелся какой-либо заряд  $q_1$ , а к моменту времени  $t_2$  этот заряд изменился на  $q_2$  за счет того, что часть заряда равномерно перемещалась вместе со свободными носителями заряда через рассматриваемое сечение проводника, то сила тока в этом проводнике может быть определена по формуле:

$$I = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1}, \quad (3.1)$$

где  $I$  и есть сила тока, измеряемая в амперах (А)<sup>34</sup>. Сила тока в 1А – достаточно большая сила тока, как правило, смертельная для человека. Поэтому в подавляющем большинстве случаев, особенно в медицине, приходится иметь дело с гораздо меньшими токами: от единиц до десятков миллиампер ( $1\text{мА}=10^{-3}\text{А}$ ). При этом знак силы тока в уравнении (3.1) определяет направление протекания свободных зарядов по проводнику. За положительное направление электрического тока в цепи в физике условно принято направление движения *положительных зарядов*, хотя, как мы теперь точно знаем, в металлических проводниках ток обеспечивается движением отрицательных зарядов – электронов (рис. 3.1).

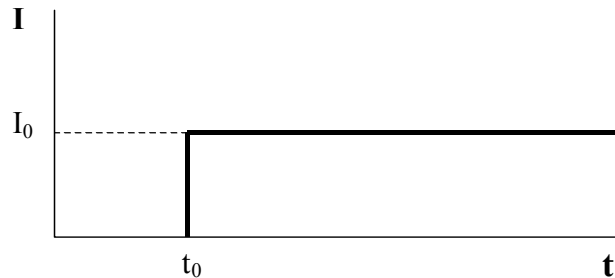


**Рис. 3.1.** Выбор направления тока в проводнике.

<sup>33</sup> Не смотря на то, что эта характеристика и называется «силой», отношение к понятию обычной физической (векторной) силы она имеет весьма отдаленное. Просто в первых опытах для ее измерения использовалась магнитная стрелка, помещаемая рядом с проводником с током. По тому, «сильно» отклонялась стрелка при включении тока в цепи от своего начального положения или нет, и судили о «силе тока».

<sup>34</sup> В честь, естественно, Ампера, который первым и употребил принятый теперь повсеместно термин «сила тока».

*Постоянный электрический ток*<sup>35</sup> – это такой ток, направление и сила которого в цепи не меняются со временем с момента его появления. Другими словами, если в цепи до момента времени  $t_0$  тока не существовало, а в момент времени  $t_0$  возник постоянный ток силой  $I_0$ , то график силы постоянного тока во времени будет иметь следующий вид:



**Рис. 3.2.** Типовой график силы постоянного тока в проводнике с течением времени.

Постоянный электрический ток может существовать в проводниках только при условии, что напряженность электрического поля в проводнике отлична от нуля и не изменяется с течением времени (после возникновения тока). Соответственно, для этого на концах проводника должна присутствовать постоянная и неизменная во времени разность потенциалов  $\Delta\varphi=U$ . Поскольку движение зарядов в проводнике обусловлено силой Кулона и направлено оно на выравнивание разности потенциалов  $\Delta\varphi$  (заряды двигаются к противоположно заряженным полюсам), поддерживать постоянную разность потенциалов на концах проводника можно лишь за счет каких-либо *сторонних сил* (приспособлений или устройств). Такие устройства называются сегодня в радиотехнике или в быту *источниками напряжения* (аккумуляторы, например, батарейки, сетевые блоки питания и т.п.). Но в физике сохраняется и по сей день и другое их название – *источники электродвижущей силы (э.д.с.)*, первоначально введенное в употребление в смысле источника неких сторонних сил, поддерживающих постоянной разность потенциалов  $\Delta\varphi$  на концах проводника. Через источник э.д.с. электрическая цепь постоянного тока оказывается всегда замкнутой, а энергия, необходимая для совершения работы по постоянному перемещению зарядов в проводнике, содержится внутри источника э.д.с. (например, химическая энергия гальванической батарейки). Э.д.с. источника напряжения измеряется, естественно, как и напряжение, в вольтах, а напряжение на концах проводника в цепи с источником э.д.с. численно равно э.д.с. источника минус потери напряжения внутри самого источника э.д.с.

Сила тока в проводнике и напряжение (разность потенциалов) на концах проводника (рис. 3.1) прямо пропорциональны друг другу, т.е. связаны между собой прямо пропорциональной

<sup>35</sup> В некоторых руководствах по физиотерапии можно встретить еще старое его название «гальванический ток».

зависимостью. Хочется надеяться, что эта зависимость хорошо известна читателю и не требует особых пояснений:

$$U = R \cdot I, \quad (3.2)$$

где коэффициент пропорциональности  $R$  называется *сопротивлением* проводника постоянному току (*активным сопротивлением*). Сопротивление в системе СИ измеряется в *омах* (Ом), а вся эта зависимость носит название «*Закон Ома*» в честь его первооткрывателя. С физической точки зрения сопротивление  $R$  полностью оправдывает свое название. Поскольку электрический ток – это механическое движение (перемещение) электрических зарядов внутри проводника, атомы материала проводника и другие внутренние структурные элементы и неоднородности (трещины, инородные включения и т.п.) являются определенными препятствиями для движения зарядов, т.е. они оказывают этому движению сопротивление. Плотные однородные материалы, содержащие большое количество свободных носителей зарядов, например, металлы, имеют достаточно низкое сопротивление постоянному току. Так, кусок медной проволоки диаметром 1 мм и длиной 100 метров (!) имеет сопротивление постоянному току  $R$  всего около 2 Ом. Материалы с маленьким числом свободных носителей зарядов имеют существенно больше сопротивление. Часто при очень большом сопротивлении материалов говорят, что они являются *диэлектриками* (или *изоляторами*), т.е. материалами, не пропускающими электрический ток. К таким материалам обычно относят в электротехнике резину, слюду, полиэтилен и пр. Очевидно, что это деление материалов на проводники и диэлектрики весьма условно. Весь вопрос в том, какая сила тока потечет через такой материал при приложении к нему какого-либо напряжения. Так, в общем случае, воздух является диэлектриком для постоянного тока, поэтому неизолированные проводники с постоянным током могут располагаться в воздухе на достаточно близком расстоянии друг от друга (как в линии электропередачи на 220В), и между ними тока течь не будет, или будет течь очень маленький ток (*ток утечки*) за счет ионов воздуха. Однако при повышении напряжения на проводах и достижении напряженности поля в 100 кВ/м (или около того) произойдет так называемый пробой в воздухе и между проводами возникнет электрическая дуга – плазменный разряд (как при электросварке), т.е. по воздуху потечет достаточно большой ток.

Биологические ткани проводят постоянный электрический ток в основном не за счет движения электронов, а за счет движения различных ионов ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^+$ ,  $Cl^-$ ,  $OH^-$  и др.), в большом количестве содержащихся в плазме клеток, крови, межклеточной жидкости и т.д. Однако указать точные значения  $R$  для разных биологических тканей весьма затруднительно. Сопротивление тканей зависит как от физиологических и анатомических особенностей конкретного человека и/или конкретного типа ткани, так и от уровня кровенаполнения тканей, ее температуры,

поверхностной влажности, плотности и т.п. В зависимости от этих параметров сопротивление одной и той же ткани может меняться на порядки. И, прежде всего, сопротивление биологических тканей сильно зависит от содержания в них воды, т.к. вода, за счет ионов  $H^+$ ,  $OH^-$  и различных примесей (солей), является достаточно хорошим проводником электрического тока. На измерении электрического сопротивления тканей основаны, например, разные методы электродиагностики в медицине – реография, импедансная томография и т.п. Для практикующего же физиотерапевта важны не столько сами значения  $R$ , сколько параметры тока (сила тока), который будет протекать по тканям при тех или иных процедурах гальванизации, электрофореза и т.п. Важно также понимать физику происходящих при этом процессов и основной механизм возникновения электрического тока – физическое перемещение различных ионов и других свободных зарядов внутри тканей между налагаемыми на тело пациента электродами.

В зависимости от размеров ионов и созданного электрического поля, скорость перемещения ионов внутри ткани существенно различается. Приблизительную скорость движения разных ионов можно себе представить по *таблице Аррениуса*<sup>36</sup>. В ней указано примерное расстояние в миллиметрах, которое в среднем проходят ионы в тканях за 30 мин при созданном электрическом поле в 1В на 1 см пути. Фрагмент таблицы Аррениуса приведен ниже:

**Таблица 3.1**

Фрагмент таблицы Аррениуса

Тип иона	Пройденный путь, мм
$H^+$	58
$OH^-$	32
$C^+$	12
$K^+$	12
$Na^+$	8

Как видно из таблицы, скорость перемещения ионов в тканях в общем случае достаточно мала, поэтому требуется достаточно длительное время для перемещения ионов на большие расстояния или большая разность потенциалов между электродами. Правда, здесь не учитывается то, что ионы могут подхватываться потоком крови и лимфы, т.е. они могут перемещаться и на более длинные дистанции за указанное время. Но это уже будет происходить чисто по законам гидродинамики, а не за счет электрического тока.

Важно также понимать, что при наложении электродов на тело пациента ток будет протекать между электродами по всем возможным путям движения ионов, а не только по кратчайшему пути между электродами. Больше сила тока будет по тому пути, где меньше сопротивле-

<sup>36</sup> **Сванте Аррениус** (1859-1927) – шведский химик, автор теории панспермии (переноса и зарождения жизни из космоса), а также теории проводимости тока растворами кислот, щелочей и солей. Он первым применил термин Фарадея «ион» для обозначения заряженных частиц растворов электролитов.



ние и наоборот. Кроме того, ионы двигаются в тканях, полностью согласуясь с законом Кулона, т.е. положительно заряженные ионы будут двигаться по направлению к *катоду* – электроду с отрицательным потенциалом (их часто поэтому называют *катионами*), а отрицательно заряженные ионы будут двигаться к *аноду* – электроду с положительным потенциалом (их называют *анионами*). Соответственно и введение разных лекарств с ионами разной полярности при электрофорезе необходимо производить с разных электродов. Вводимые ионы должны отталкиваться от того электрода, из-под которого они вводятся, и притягиваться другим, противоположным по знаку потенциала электродом. Поэтому, при проведении процедур лечебного электрофореза необходимо четко представлять, какой заряд несут ионы того или иного лекарственного препарата в приготовленном растворе. Такие данные, как правило, содержатся во многих учебниках и справочниках по физиотерапии. Есть они и в справочниках по лекарственным препаратам.

Полезно также помнить основные законы *электролиза*<sup>37</sup> – *законы Фарадея*, которыми описываются основные процессы и при электрофорезе. *Первый закон Фарадея* гласит, что количество вещества, выделяемого на электроде, прямо пропорционально электрическому заряду, прошедшему через электролит. Поскольку, согласно (3.1), заряд есть произведение силы тока на время, количество выделяемого вещества при электролизе будет прямо пропорционально силе тока и времени его действия. Коэффициент пропорциональности в этом соотношении численно равен массе выделившегося вещества при прохождении через электролит единичного заряда. Его часто называют *электрохимическим эквивалентом вещества*. *Второй закон Фарадея* определяет, что электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны отношению атомного веса молекулы вещества к ее валентности.

Поскольку все биологические ткани и любые другие проводники электрического тока, как уже указывалось, обладают электрическим сопротивлением, часть энергии движущихся в них зарядов будет в том или ином виде расходоваться на преодоление этого сопротивления. А это означает, что часть энергии электрического поля будет переходить в тепло: проводники с током практически всегда нагреваются<sup>38</sup>. Это еще один постоянно действующий физический фактор при проведении любых процедур с использованием постоянного электрического тока. Количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током за промежуток времени  $t$ , может быть определено по *закону Джоуля-Ленца*:

<sup>37</sup> Электролиз – выделение на электродах составных частей растворенных в электролитах веществ.

<sup>38</sup> Сильный нагрев, например, вольфрамовой нити накаливания в электрических лампочках обеспечивает их видимое свечение (см. главу 7). Есть, правда, особые сплавы металлов и полупроводников, которые при прохождении по ним электрического тока охлаждаются. Это так называемый в физике «*эффект Пельтье*».

$$Q \approx 0.24 \cdot U \cdot I \cdot t, \quad (3.3)$$

где  $Q$  – количество выделяемой теплоты в калориях,  $t$  – время в секундах. В этом выражении произведение  $UI$  фактически играет роль механической мощности при изменении тепловой энергии проводника с током. В электротехнике и физике величина

$$W = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (3.4)$$

так и называется – электрическая мощность, потребляемая проводником с током. Измеряется она также как и механическая мощность в системе СИ в ваттах (Вт). Это очень важный параметр и в технике, и в медицине, и в быту. Часто, например, потребляемую мощность электробытовых приборов, скажем электрических ламп накаливания, выражают в ваттах. Это позволяет примерно<sup>39</sup> оценить ток, который будет протекать в их цепи. Для мощности лампочки, например, в 100 Вт и сети с напряжением 220 В протекаемый ток через лампочку будет равен примерно 0.45А.

Иногда в разделах о постоянном электрическом токе описывают еще такие физические понятия, как *плотность тока* (сила тока, деленная на площадь поперечного сечения проводника), *удельное сопротивление проводника* (сопротивление одного метра проводника, деленное на площадь его поперечного сечения), *удельная проводимость проводника с током* (величина, обратная удельному сопротивлению) и т.п. Однако для практикующего физиотерапевта это мало что добавляет к уже описанным физическим явлениям и величинам в смысле их грамотного применения в реальной клинической практике. В каком-то смысле указанные величины и соотношения являются даже очевидными, и, поэтому, мы не будем здесь на них подробно останавливаться.

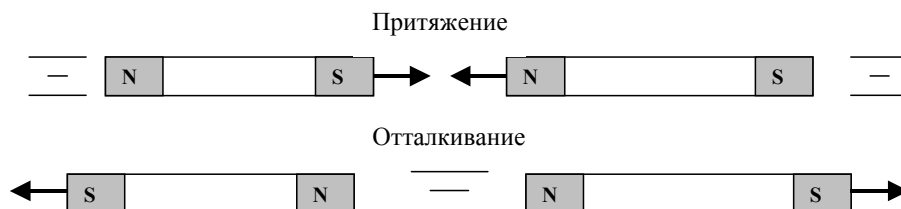
---

<sup>39</sup> Строго говоря, такое определение не совсем корректно, т.к. указанные формулы и понятия справедливы лишь для цепи постоянного тока. Бытовые же приборы сегодня повсеместно включаются в сеть переменного тока (см. главу 5) и потребляемая ими мощность зависит не только от их активного сопротивления, но также и от их индуктивного и/или емкостного, т.е. «реактивного» сопротивления.

## Глава 4. Постоянное магнитное поле (магнитостатика)

Вообще говоря, магнитные явления, как и электрические, были хорошо известны людям уже в древние времена. Первые найденные письменные упоминания о природных постоянных магнитах относятся к Китаю и имеют более чем 2000-летнюю давность. Родоначальник древнегреческой философии **Фалес из Милета** (VI в до н.э.) описывал магнит, как субстанцию, имеющую душу, вследствие того, что он притягивает железо. В средние века часто жрецы, алхимики, да и служители Христианской Церкви использовали природные магниты, как и явления электростатики, для демонстрации различных «сверхъестественных» и «божественных» сил. С развитием мореплавания и созданием компаса как навигационного прибора (примерно в XII веке) возник интерес к изучению законов магнетизма уже с позиции науки. Первой попыткой экспериментального изучения свойств магнитов разной формы явились работы французского ученого **Пьера де Марикура** (1269г.), а уже во времена Колумба были поставлены серьезные задачи изучения магнитного поля Земли и проблем магнитного склонения на поверхности Земли для целей мореходства.

Исторически изучение магнитных явлений, проявляющихся при опытах с постоянными природными магнитами и магнитным полем Земли, развивалось совершенно отдельно, параллельно исследованиям электричества. Изначально господствовало мнение, что эти два раздела физики абсолютно не связаны между собой, хотя и было замечено, что подобно электрическим зарядам постоянные магниты могут притягиваться или отталкиваться друг от друга в зависимости от их взаимной ориентации. Это наталкивало на мысль, что существуют две разновидности полюсов магнитов, подобно двум разновидностям зарядов, а действие магнитных сил очень похоже на действие сил гравитации или кулоновских сил электрического притяжения и отталкивания.

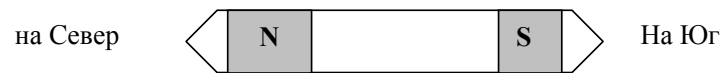


**Рис. 4.1.** Взаимодействие двух магнитов.

Разноименные полюса притягиваются, одноименные отталкиваются.

Первой наиболее последовательной научной работой, посвященной исследованию магнитных явлений с позиции физики, явилась, видимо, книга **У.Гильберта** «О магните, магнит-

ных телах и великом магнитном поле Земли – новая физиология», вышедшая в 1600г. В ней Гильберт впервые дал правильное объяснение поведению магнитной стрелки компаса в магнитном поле Земли. Он установил факт намагничивания железа (явление *магнитной индукции*), показал, что распиливанием магнита на сколь угодно малые части нельзя отдельно получить магниты с одним отдельно взятым полюсом – в любом куске магнита всегда оказывается два полюса. Позднее эти полюса получили название «Северный» (N) и «Южный» (S), а на самих магнитах и магнитных стрелках компасов они стали помечаться, соответственно, синей и красной краской. Северным полюсом магнитной стрелки компаса по определению называется полюс, обращенный к северу Земли. Таким образом, северный магнитный полюс Земли представляет собой, на самом деле, южный полюс магнита «Земля».



**Рис. 4.2.** Расположение и обозначение полюсов обычного постоянного магнита.

Вопрос о величине действующей магнитной силы между двумя магнитами изучался многими учеными и, в частности, петербургским академиком **Францем Эпинусом** (1724-1802). В своем сочинении в 1759г. «Опыт теории электричества и магнетизма» он высказал предположение о зависимости этой силы от квадрата расстояния между магнитами. Он, правда, полагал, что магнитные силы являются следствием действия некой «магнитной жидкости», заполняющей все тела. Более точный закон взаимодействия двух магнитов был несколько позже изучен и сформулирован Кулоном – автором закона взаимодействия электрических зарядов. По аналогии со своими исследованиями электрических сил он схожим образом определил, что сила притяжения и отталкивания «магнитных жидкостей» прямо пропорциональна их плотности и обратно пропорциональна квадрату расстояния между «магнитными молекулами».

В 1819г. датский физик и химик **Ханс Кристиан Эрстед**<sup>40</sup> (1777-1851) во время занятий со студентами сделал открытие, положившее начало исследованиям по связи электрических и магнитных явлений. Он обнаружил, что электрический ток в проводе отклоняет стрелку магнитного компаса. Годом позже француз **Франсуа Араго** (1786-1853) показал, что проволока с током притягивает железные опилки, а пара французских ученых - **Жан Батист Био** (1774-1862) и **Феликс Савар** (1791-1841) установили количественный закон действия постоянного тока на магнитную стрелку. В том же году электромагнитными явлениями заинтересовался А. Ампер и исследовал силы магнитного притяжения двух проводников с током. Но полностью

<sup>40</sup> Эрстед родился в семье аптекаря и первоначально (в 20 лет) получил диплом фармацевта, а в 22 года - диплом доктора философии (Ph.D. в современной интерпретации).

обнажило единую картину взаимосвязи всех электрических и магнитных явлений экспериментальное открытие в 1831г. М.Фарадеем явления электромагнитной индукции.

Тем не менее, как было установлено позже, между магнитными и электрическими явлениями полной аналогии нет. Прежде всего, это проявляется в том, что источниками статического электрического поля являются реальные положительные и отрицательные электрические заряды, а магнитные заряды (магнитные монополи **Дирака**<sup>41</sup>) в природе до сих пор так и не обнаружены. Согласно современным физическим представлениям магнитное поле порождается движением электрических зарядов и особенностями микроскопического (квантово-механического) состояния и строения вещества. Количественно магнитное поле характеризуется *напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$  и вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$* , подобно тому, как электрическое поле характеризуется векторами  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$ . Соответственно, для магнитного поля также могут быть построены силовые линии магнитного поля. В случае однородной и изотропной среды без первоначальной намагниченности вектора магнитного поля  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{B}$  связаны соотношением, аналогичным (3.4):

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H} \quad (4.1)$$

где:  $\mu_0$  – фундаментальная *магнитная постоянная* или *магнитная проницаемость вакуума* ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $\mu$  - *относительная* (относительно вакуума) *магнитная проницаемость среды* (как правило, для подавляющего большинства биологических тканей и сред с очень большой степенью точности можно принять  $\mu=1$ ). Напряженность магнитного поля (модуль вектора  $\mathbf{H}$ ) измеряется в «амперах/метр» (А/м). Но с точки зрения физиотерапии основной силовой характеристикой поля является вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , который определяет величину *магнитного потока  $\Phi_m$* , пронизывающего произвольную поверхность  $S$ :

$$\Phi_m = B_n \cdot S, \quad (4.2)$$

где  $B_n$  – проекция вектора  $\mathbf{B}$  на нормаль к поверхности  $S$ . Магнитная индукция измеряется в системе СИ в «теслах<sup>42</sup>» (Т или Тл)<sup>43</sup>. Так, магнитное поле Земли оценивается сегодня магнит-

<sup>41</sup> Гипотеза о возможном существовании в природе отдельных магнитных зарядов была высказана английским физиком, одним из основателей квантовой механики **П.А.М.Дираком** в 1931г. на основе анализа классических законов теории электромагнетизма и квантовой физики. Эти законы не содержат никаких запретов, в силу которых магнитные заряды не могли бы существовать в принципе. Более того, в современной квантовой механике нет никакого другого внятного объяснения наблюдающемуся в природе квантованию электрических зарядов элементарных частиц, кроме как предположения о существовании магнитных монополей. Однако многочисленные попытки их экспериментально обнаружить пока так и не привели к успеху.

<sup>42</sup> В честь югославского ученого **Никола Тесла** (1856-1943), работы которого окутаны множественными мифами, вплоть до его авторства в происхождении Тунгусского метеорита.

<sup>43</sup> В разных отечественных физических справочниках – по-разному. Мы будем придерживаться обозначения «Тл» согласно физическому энциклопедическому словарю (см. список литературы).

ной индукцией в 0.1-0.5 миллитесла (мТл). Токи, например,  $\alpha$ -ритма мозга создают магнитное поле порядка  $10^{-15}$  Тл, т.е. 1Тл – достаточно сильное магнитное поле. Поэтому в практике физиотерапии используются магнитные поля только в единицы и десятки миллитесла (1мТл =  $10^{-3}$ Тл). Величина же магнитного потока  $\Phi_m$ , измеряемая в «Тл·м<sup>2</sup>» и носящая отдельное название «вебер» (Вб) в честь немецкого физика **В.Вебера** (1802-1891), обобщившего закон Ампера (см. ниже), в практике физиотерапии встречается редко.

Если предварительно среда имела исходную *намагниченность*  $\mathbf{J}$  (магнитный момент единицы объема вещества), соотношение (5.1) несколько видоизменится:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{J}). \quad (4.3)$$

Для однородных изотропных сред (свойства которых не зависят от координат рассматриваемой точки внутри тела) и при слабых магнитных полях, с которыми обычно имеют дело в физиотерапии:

$$\mathbf{J} = \chi \cdot \mathbf{H},$$

поэтому уравнение (4.3) можно переписать в виде, аналогичном уравнению (4.1), с относительной магнитной проницаемостью среды, равной:

$$\mu = 1 + \chi,$$

где  $\chi$  - *магнитная восприимчивость среды*.

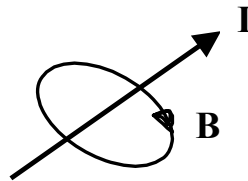
В зависимости от того, каковы у различных материалов и сред величины и знаки для параметров  $\mu$  и  $\chi$ , различают вещества с разными магнитными свойствами: диамагнетики ( $\mu < 1$  и  $\chi < 0$ ), парамагнетики ( $\mu > 1$  и  $\chi > 0$ ) и наиболее сильно намагничиваемые материалы – ферромагнетики ( $\mu \gg 1$  и  $\chi \gg 0$ ). Как уже указывалось ранее, подавляющее большинство биологических тканей и сред являются средами с  $\mu = 1$  ( $\chi \approx 0$ ) и они, вообще говоря, практически не преобразуют (не ослабляют) энергию падающего на них внешнего магнитного поля. Как правило, все они являются слабыми диамагнетиками. Действие магнитного поля, в основном, проявляется в них лишь в способности магнитного поля взаимодействовать с движущимися в тканях электрическими зарядами. На любой электрический заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\mathbf{v}$  в магнитном поле  $\mathbf{B}$ , действует так называемая *сила Лоренца*  $\mathbf{F}_L$ :

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (4.4)$$

где в квадратных скобках указана операция векторного перемножения вектора скорости движущегося заряда и вектора магнитной индукции поля. Величина заряда в этой формуле берется с соответствующим знаком, а направление действия силы при положительном знаке заряда определяется по *правилу «левой руки»*: если левую ладонь расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля (вектора  $\mathbf{B}$ ) были направлены перпендикулярно ладони, вектор скорости дви-

жения заряда совпадал бы по направлению с вытянутым вперед указательным пальцем руки, то направленный вверх большой палец левой руки укажет направление действующей на заряд силы Лоренца<sup>44</sup>. Для отрицательного движущегося заряда направление действия  $F_L$  – противоположное (вниз). Т.е. сила Лоренца действует перпендикулярно как вектору скорости движения заряда в магнитном поле, так и силовым линиям поля.

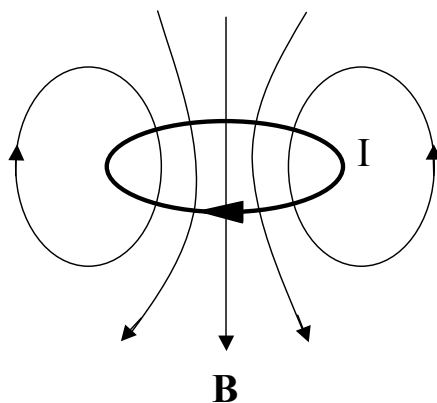
Как было сказано выше, движение электрических зарядов в проводниках с током и магнитное поле очень тесно связаны между собой. Вокруг проводника с постоянным током  $I$  всегда имеется (возникает) постоянное магнитное поле  $\mathbf{B}$ . Силовые линии магнитного поля в пространстве не имеют ни начала, ни конца, в противоположность линиям электрического поля, а всегда замкнуты сами на себя, т.к. до сих пор официально считается, что магнитных зарядов в природе нет. Направление движения положительных зарядов в проводнике, т.е. направление силы тока  $I$  в проводнике и направление вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  магнитного поля, которое порождается в пространстве вокруг проводника с током, связаны между собой *правилом буравчика* (правилом правостороннего винта):



**Рис. 4.3.** Связь между направлением силы тока в проводнике с током и вектором  $\mathbf{B}$ .

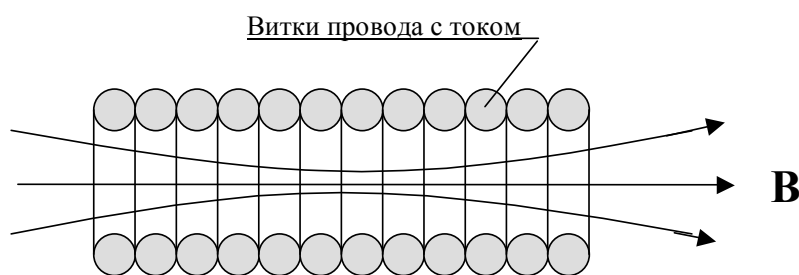
Согласно этому правилу (см. рис. 4.3), если расположить винт вдоль провода и мысленно поворачивать его по направлению силовых линий  $\mathbf{B}$ , то винт будет «вворачиваться» или «выворачиваться» (в зависимости от того, куда была направлена его ножка), перемещаясь по направлению силы тока в проводе  $I$ . Если же проводник с током сам представляет собой замкнутый контур – виток с током, то силовые линии магнитного поля будут пронизывать сечение этого витка и образовывать вокруг него внешние замкнутые «витки» магнитного поля:

<sup>44</sup> **Г.А.Лоренц** (Лорентц) (1853-1928) – голландский физик, автор этого закона и один из соавторов специальной теории относительности А.Эйнштейна.



**Рис. 4.4.** Магнитное поле витка с током  $I$ .

Это явление широко используется в технике для создания так называемых *электромагнитов* – катушек с большим числом витков тока<sup>45</sup>, способных создавать сильное постоянное магнитное поле:



**Рис. 4.5.** Катушка с большим числом витков с током (в разрезе) и характер силовых линий магнитного поля.

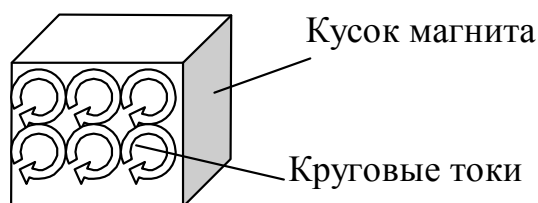
Такая конфигурация магнитных силовых линий очень напоминает магнитные силовые линии куска металлического постоянного магнита. Это дало повод задуматься над связью между свойствами постоянных магнитов и магнитными свойствами витков с током.

Строгая современная микроскопическая теория магнитных свойств материалов существенно более сложная, чем теория их электрических свойств. Она оперирует понятиями атомной физики и квантовой механики и, видимо, не является пока еще достаточно полной и окончательной физической теорией, особенно в свете непрекращающихся попыток поиска магнитных монополей Дирака. Однако простейшие представления о том, что «происходит» внутри магнита или намагниченного им материала можно получить уже на основе гипотезы Ампера. А.Ампер в 1820 году на основе экспериментальных данных Эрстеда о взаимодействии проводника с током и магнитной стрелки очень удачно предположил, что магнитное поле в магнитах порождается

<sup>45</sup> Иногда их называют *индукторами* или *соленоидами*.



электрическим током, т.е. движущимися электрическими зарядами. Согласно его гипотезе каждый магнит представляет собой тело, в котором протекают в одном и том же направлении собственные круговые молекулярные микротоки. Подобно маленьким виткам с током они все по тому же правилу правого винта (буравчика) и создают в окружающем магнит пространстве постоянное магнитное поле  $\mathbf{B}$  (рис. 4.6.).



**Рис. 4.6.** Представления Ампера о постоянном магните, как о среде с внутренними замкнутыми круговыми микротоками.

Далее Ампер исследовал взаимодействие двух параллельных проводников с током и показал, что провода с токами одного направления притягиваются друг к другу, а провода с токами противоположных направлений отталкиваются. Полностью подтвердив свою гипотезу, Ампер дал возможность, таким образом, отказаться в физике от архаичного понятия «магнитной жидкости» и предвосхитил последующее создание объединенной электромагнитной теории. Особо плодотворной его теория казалась в тот момент, когда были открыты электронные орбиты внутри атомов. Казалось, что все очень просто, что внутренние микротоки в магните создаются простым синхронным вращением электронов на своих орбитах внутри атомов в одну и ту же сторону.

Однако дальнейшее более углубленное изучение микроскопических явлений внутри магнитных и не магнитных материалов показало, что магнитные свойства вещества определяются не только вращением электронов по орбитам внутри молекул и атомов (орбитальный магнитный момент атомов), но и собственным (спиновым) магнитным моментом отдельных электронов в атоме. Эти явления уже достаточно сложны для элементарного изложения и описываются только в терминах современной квантовой физики. Более того, группы атомов и молекул внутри магнитов образуют особые кластеры (домены), которые представляют собой отдельные маленькие намагниченные области – некие «элементарные магнетики», которые и определяют общие магнитные свойства любого материала. Но все эти подробности не сильно могут помочь физиотерапевту в понимании физической сути магнитных явлений в дополнение к гипотезе Ампера. Можно лишь добавить, что во внешнем магнитном поле любые атомы, молекулы и их кластеры в зависимости от их принадлежности к пара- (ферро-) или диамагнетикам будут стараться намагничиваться и ориентироваться соответственно по направлению поля или против него, причем намагниченные *диамагнетики*, такие как медь, серебро, золото, вода и т.п. будут

выталкиваться из приложенного внешнего магнитного поля. Кроме того, магнитные свойства любых магнитных материалов очень сильно зависят от их температуры и возникающих внутри них механических напряжений, поэтому с имеющимися образцами магнитов в отделениях и кабинетах физиотерапии надо обращаться весьма бережно – не подвергать их нагреву, сильным механическим ударам, не хранить рядом с металлическими предметами. Все это может привести к порче магнитов, их быстрому «старению» и изменению величины их магнитной индукции.

В завершение рассказа о постоянном магнитном поле можно указать, что для бесконечно длинного прямого и одиночного проводника с током модуль вектора  $\mathbf{B}$  на расстоянии  $r$  от оси проводника при  $r$  большем, чем радиус проводника, может быть определен по формуле:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} . \quad (4.5)$$

А магнитный поток витка (катушки) с током  $\Phi_m$ , пронизывающий поперечное сечение витка или катушки в целом, прямо пропорционален силе протекающего по витку (виткам) тока  $I$ :

$$\Phi_m = L \cdot I . \quad (4.6)$$

В этой формуле коэффициент пропорциональности  $L$  носит название *индуктивности катушки* (витка с током) и измеряется в «генри» (Гн)<sup>46</sup>. Соответственно и магнитная проницаемость вакуума  $\mu_0$  имеет размерность «генри/метр» (см. соотношение 4.1). Теперь наименование такой размерности для  $\mu_0$  должно быть понятно.

---

<sup>46</sup> **Джозеф Генри** (1797-1878) – американский физик и инженер, независимо от Фарадея открывший электромагнитную индукцию и создавший много новых и уникальных технических устройств – мощный электромагнит, телеграф на основе катушек с током и др.

## Глава 5. Переменный электрический ток и электромагнитное поле

В общем случае в электрических цепях сила электрического тока не обязательно будет иметь неизменную зависимость от времени, которая была изображена на рис. 3.2. Эта зависимость может быть сколь угодно произвольной. Например, рис. 5.1 иллюстрирует разные графики изменения силы тока в цепи со временем.

В природе и современной технике могут встречаться самые причудливые формы зависимости силы тока от времени. В физиотерапии тоже рассматриваются разные формы зависимости силы тока от времени и они, как правило, именуется разными оригинальными названиями – синусоидальный ток, ондулирующий, пульсирующий, флуктуирующий и т.п.

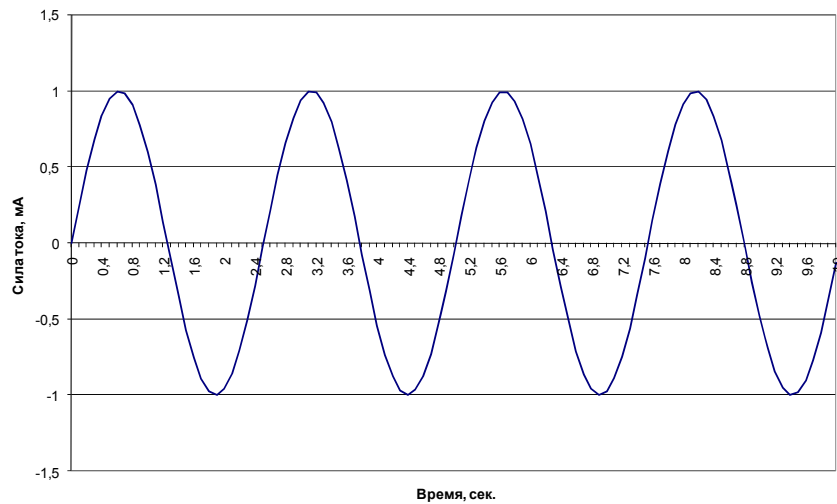


Рис. 5.1(а) Синусоидальный гармонический ток.

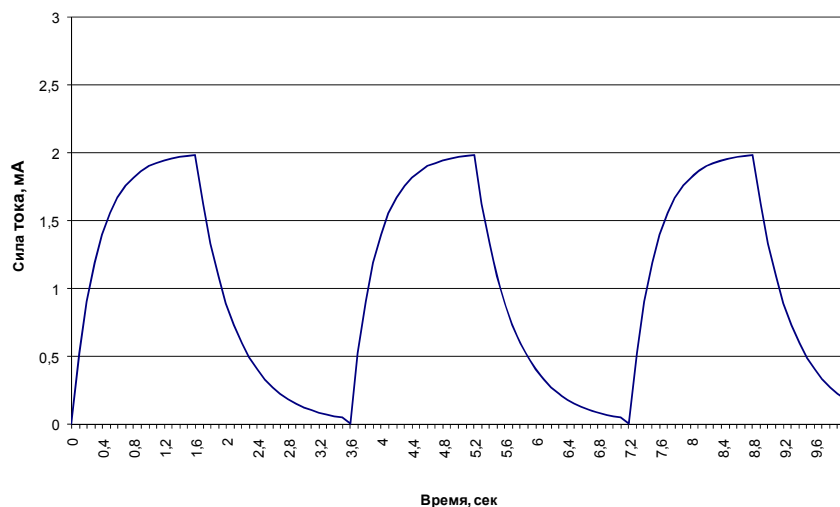
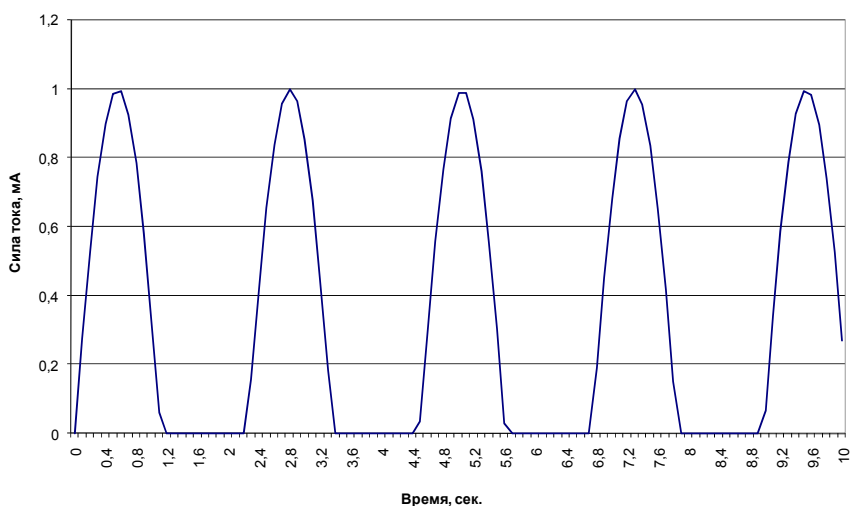
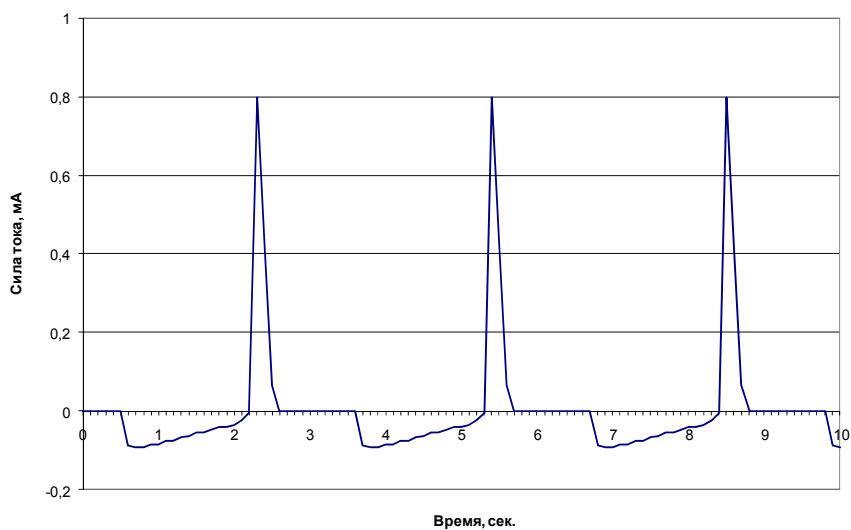


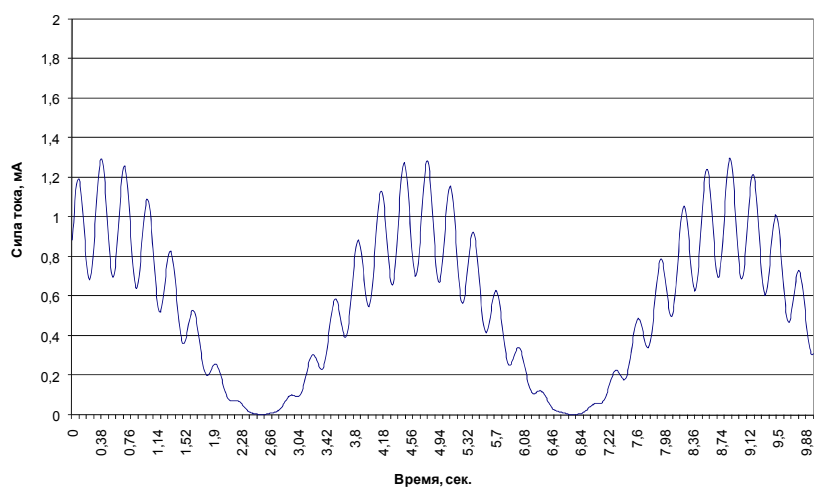
Рис. 5.1(б) Пилообразный ток.



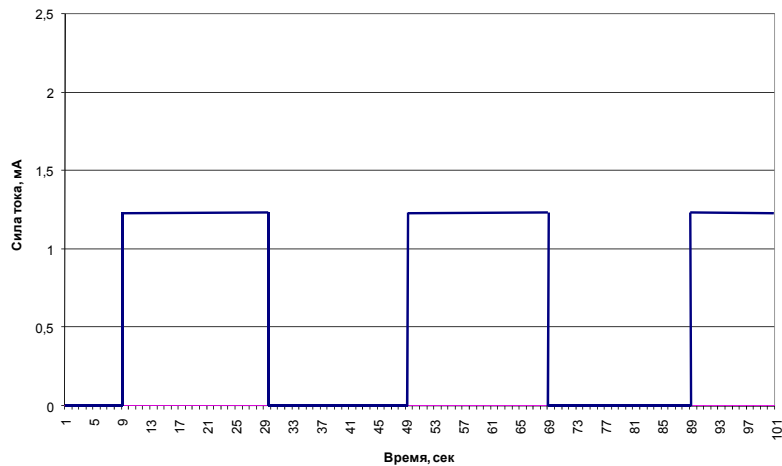
**Рис. 5.1(в)** Синусоидальный переменный ток после однополупериодного выпрямления.



**Рис. 5.1(г)** Импульсный ток (аналог Фарадического тока).



**Рис. 5.1(д)** Сложный модулированный ток (аналог тока Бернара)



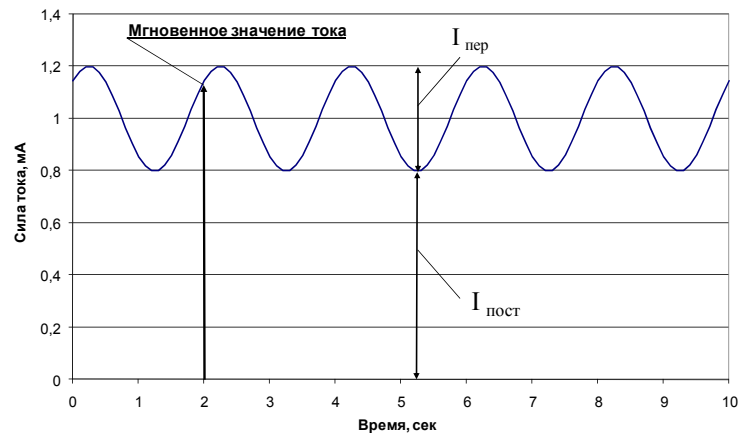
**Рис. 5.1(е)** Прямоугольный ток с 50% скважностью – меандр.

**Рис. 5.1.** Разные формы зависимости силы переменного тока от времени.

Часто эти названия ассоциированы с именем того или иного ученого – Фарадический ток, Ледюковский, Михайловский, токи Бернара и др. Однако в физике не принято давать выделенные названия различным переменным токам по имени или фамилии кого бы то ни было. Это не основополагающие физические законы, а просто разные зависимости силы тока от времени. Разных форм токов может быть сколь угодно много, а запоминать огромный массив имен и фамилий очень сложно. Физики всегда придерживались и придерживаются методологии установления причинно-следственных связей и выделения общих закономерностей в наблюдаемых явлениях. Поэтому они просто пользуются графиками токов или напряжений в цепи, подобно изображенному на рис. 5.1. И этого вполне достаточно. Начертив график, легко понять все особенности протекающих в такой цепи с током процессов. Иногда, для облегчения ассоциативного восприятия, используют названия, соответствующие математическим названиям схожих математических функций. Например, рис.5.1(а) соответствует графику функции синуса. Функции синуса и косинуса - особые в физике и математике. С ними связаны универсальные решения очень большого круга задач и уравнений, поэтому у них есть и более обобщенное название – *гармонические функции*<sup>47</sup> (отсюда и «гармонический» ток). На рис.5.1(б) изображена пилообразная функция (форма выступов очень похожа на зубчики пилы). Рис.5.1(е) изображает так называемый «*меандр*» - прямоугольные колебания с равными длительностями интервалов где действует ток и где его нет (равен или близок нулю). Могут быть и другие функции. Сложные функции токов, например, по рис.5.1(д)-рис.5.1(е) часто именуется *модулированными токами*

<sup>47</sup> Более строго гармоническими называются в математике функции, удовлетворяющие решению уравнения Лапласа. Тригонометрические функции синуса и косинуса являются гармоническими, т.к. они удовлетворяют уравнению Лапласа (являются его решением). Но есть и другие гармонические функции. От термина «гармонические функции» в механике произошло понятие «*гармонические колебания*», с которым мы уже встречались (см. раздел механических явлений).

(см. ниже), а достаточно короткодействующие токи, как, например, на рис.5.1(г) - *импульсными*. Но не будет большой ошибкой и все эти виды токов упрощенно называть просто переменными токами, т.к. величина тока (его амплитуда) переменна во времени. Единственное, на что следует обращать особое внимание когда речь заходит о переменных токах, особенно в физиотерапии, - является ли данный ток *знакопеременным*, или нет. Рис. 5.1(а) соответствует знакопеременному току, т.е. такому току, для которого сила тока может быть за период его действия как положительна, так и отрицательна. Рис.5.1(б), 5.1(в), 5.1(д) и (е), напротив, изображают *знакопостоянные токи*.



**Рис. 5.2.** К определению понятий мгновенного значения тока, его постоянной и переменной составляющих.

Надо сказать, что, конечно, более строго под понятием «переменный ток» надо понимать именно знакопеременный ток. Разница между ними заключается в том, что направление движения зарядов в проводнике с током или в биологических тканях при проведении физиотерапевтических процедур определяется знаком силы тока (вспомните определение силы тока). Если знак силы тока не меняется за время действия тока, а меняется только его величина (амплитуда), то заряды все время будут двигаться в одном направлении. Изменяться будет лишь количество заряда, протекающее в единицу времени через сечение проводника. Если же меняется еще и знак силы тока, то будет меняться и направление движения зарядов. При синусоидальном токе рис.5.1(а), например, заряды за один полупериод колебаний будут двигаться в проводнике с таким током в одном направлении, а в другой полупериод колебаний – в другом, т. е. заряды будут как бы совершать колебания «туда-обратно» внутри проводника с частотой изменения силы тока.

При знакопостоянном, но модулированном токе<sup>48</sup>, как изображено на рис.5.2., заряды будут двигаться всегда в одну сторону, а перенос зарядов в среднем за одну секунду через сечение проводника в  $1\text{ м}^2$  будет примерно равно  $5 \cdot 10^{-4}\text{ Кл}$  (подумайте почему).

Как мы видим, переменные токи, в отличие от постоянного тока, характеризуются в физике гораздо более многообразным набором параметров, нежели просто сила тока. Но пока мы рассмотрели лишь качественную картину. Посмотрим теперь, какими количественными характеристиками описывается в физике и технике переменный ток.

Во-первых, поскольку токи и напряжения в цепях могут, в общем случае, произвольно меняться во времени, они характеризуются как *мгновенным значением* силы тока (напряжения) в каждый момент времени  $t$ , так и некими усредненными за период колебаний тока значениями величины силы тока и напряжения, которые называются «*действующими значениями*» соответственно силы тока или напряжения за выбранный период времени. Мгновенное значение силы тока (напряжения) – это то значение функции на графике, которое непосредственно соответствует выбранному моменту времени  $t$  (см. рис. 5.2). Наибольшее из мгновенных значений периодически изменяющихся токов или напряжений называют, также, максимальным или *амплитудным значением* силы тока (напряжения). Именно мгновенное значение переменного тока по определению будет соответствовать величине переносимого электрического заряда через сечение проводника в единицу времени. Точно также, как соответствует величине переносимого заряда в единицу времени сила постоянного тока (см. формулу 3.1). Действующее же значение силы тока или напряжения (иногда его еще называют *эффективным значением*) равно значению такого эквивалентного постоянного тока, который одинаково с переменным током нагреет один и тот же проводник с током с одним и тем же активным сопротивлением. Математически – это среднеквадратичное значение силы тока за период времени его действия.

В простейшем и наиболее важном в бытовом смысле случае рассматривается часто во многих учебниках в качестве примера переменный ток в обычных домашних розетках на  $\sim 220\text{ В}$ . Рассмотрим и мы такой пример, чтобы лучше запомнить разницу в мгновенных и действующих значениях. В наших обычных розетках присутствует синусоидальный гармонический ток по

---

<sup>48</sup> Часто такой ток называют просто постоянным, модулированным по амплитуде током. В данном случае можно говорить о синусоидальной модуляции амплитуды тока. У такого тока еще иногда выделяют постоянную ( $I_{\text{пост}}$ ) и переменную ( $I_{\text{пер}}$ ) составляющие тока. Под постоянной составляющей ( $I_{\text{пост}}$ ) в большинстве случаев понимается минимально неизменное во времени значение силы тока. Тогда переменная составляющая будет знакопостоянна. Можно за постоянную составляющую взять среднее значение силы тока (на графике это  $I=1\text{ мА}$ ). Тогда переменная составляющая будет знакопеременна. Здесь до сих пор нет однозначно устоявшейся терминологии.

типу рис. 5.1(а), который имеет частоту колебаний  $\nu=50$  Гц<sup>49</sup>. Мгновенное значение напряжения для такого тока определяется выражением, аналогичным формуле 1.12:

$$u = U_m \cdot \sin(2\pi\nu t), \quad (5.1)$$

где  $u$  – мгновенное значение напряжения в розетке;  $U_m$  – максимальное (амплитудное) значение напряжения в розетке,  $t$  – время. Действующее значение такого напряжения  $U$  рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (5.2)$$

Так вот. Всем известное значение напряжения в розетках наших домов и больниц в 220 В – это действующее значение напряжения, т.е.  $U$ . Запомните: на шкалах измерительных приборов, в технической документации, инструкциях по эксплуатации и т.п. всегда указывают действующее значение величин. Максимальное же мгновенное значение напряжения, с которым можно «столкнуться» (не дай Бог!) в наших розетках, легко вычислить по формуле (5.2):

$$U_m = U \cdot \sqrt{2} = 220 \cdot 1,41 = 310 \text{ В} \quad (!).$$

Оно оказывается существенно выше действующего.

Во-вторых, поскольку периодически повторяющиеся во времени токи и напряжения имеют свой период и частоту колебаний как и звуковые механические колебания, которые мы рассматривали в п.1, то частота (циклическая  $\nu$  или круговая  $\omega$ ) и, соответственно, период колебаний  $T$  также характеризуют переменный ток.

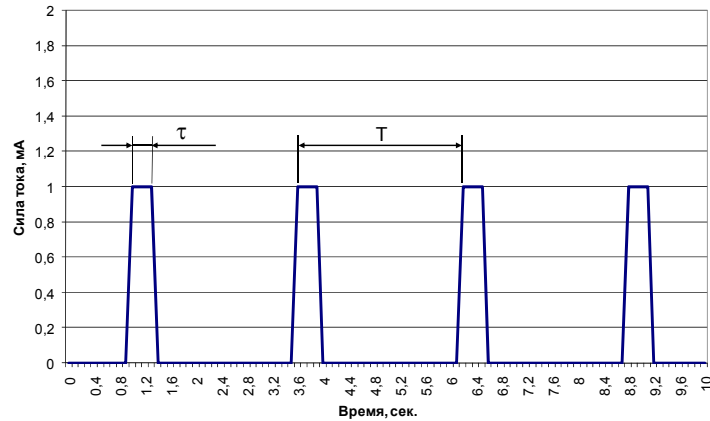
Несколько более многообразны характеристики импульсных токов. Для импульсных токов, в первую очередь, определяется форма импульса (прямоугольная, треугольная, пилообразная и т.п.), а также длительность одного импульса  $\tau$ , например, в микросекундах (мкс). Далее, если ток является импульсно-периодическим, т.е. импульсы следуют во времени равномерно, с равными интервалами между ними, скажем, как изображено на рис. 5.3, то можно определить период следования импульсов  $T$ . Любому периоду  $T$ , согласно формуле (1.10), соответствует своя частота  $\nu$ , поэтому можно, также, говорить о частоте повторения импульсов. Иногда говорят о *скважности* импульсов, т.е. о коэффициенте заполнения импульсом периода следования импульсов. Под скважностью, таким образом, понимается отношение:

$$\eta = \frac{\tau}{T} \cdot 100\% , \quad (5.3)$$

<sup>49</sup> Это относится, строго говоря, лишь к нашей стране. В США, например, принята бытовая частота тока 60Гц, а напряжение в розетках часто равно 115 В.

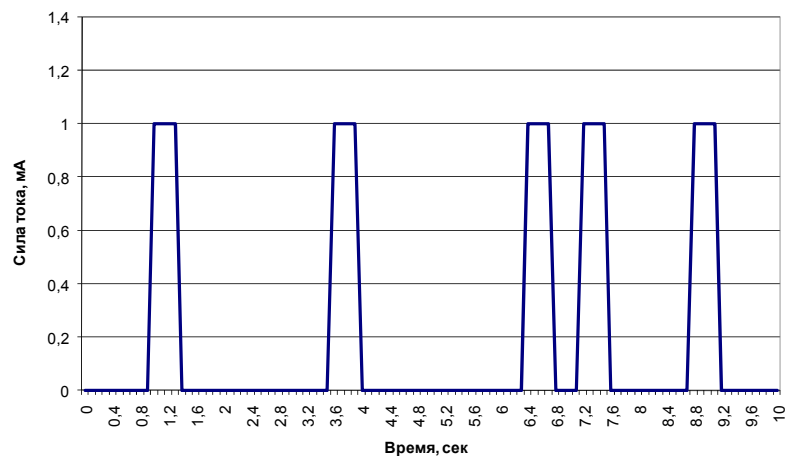


где:  $\eta$  - скважность,  $\tau$  - длительность импульса,  $T$  – период следования импульсов. Измеряется скважность в процентах. Например, для меандра, т.е. для прямоугольных импульсов рис.6.1(е), скважность составляет 50%. Постоянный ток (см. рис. 3.2), согласно этому определению, можно рассматривать как некий импульсный ток со скважностью 100% и т.д. Скважность импульсов рис.5.3 составляет примерно 20%.



**Рис.5.3.** Импульсно-периодический ток.

Если же ток не является импульсно-периодическим, как показано на рис. 5.4, то в зависимости от закона формирования импульсов такие токи описывают различными временными параметрами для серии импульсов. Иногда выделяют пачки импульсов, отдельные импульсы и т.д. Различных комбинаций здесь может быть достаточно много, поэтому не будем сейчас гадать, с какими ситуациями каждый может столкнуться на практике, но, понимая общий принцип, всегда легко догадаться, о чем идет речь в каждой конкретной ситуации.



**Рис.5.4.** Импульсный ток со случайным следованием импульсов.

Если ток не является периодическим или его форма сильно отличается от классического графика синуса или косинуса, например, как у тока, изображенного на рис.5.1(д), то такой ток весьма сложен для выражения в терминах одной какой-либо частоты или одного фиксирован-

ного периода колебаний. На рис.5.1(д) видно, что у такого тока есть, как минимум, две выделяющиеся основные частоты – более высокая, обеспечивающая частые мелкие колебания тока, и более низкая, соответствующая основным плавным колебаниям на графике. Как же точно определить, какие частоты колебаний здесь присутствуют? На помощь в этом случае приходит так называемая *теорема Фурье*, которая гласит, что любую сложную периодическую и даже, в ряде случаев, не периодическую функцию можно очень точно представить в виде суммы разных простых синусов и косинусов. В математике и физике эта операция называется «разложить в ряд по гармоническим функциям». Исходная сложная функция представляется после разложения в виде простой суммы разных синусов и косинусов с разной, но фиксированной для каждого слагаемого частотой колебаний  $\omega_i$ . И, соответственно, электрический ток, описываемый такой функцией, может быть в расчетах заменен суммой простых гармонических токов с разными частотами (набором частот) колебаний  $\omega_i$ . В этом случае говорят о *спектре частот* колебаний, как это уже встречалось нам в разделе механических колебаний. Важно здесь то, что физические законы и явления для сложного тока очень трудно описываются простыми и понятными формулами. Зато все формулы и законы достаточно просты и справедливы отдельно для каждого слагаемого с отдельной частотой  $\omega_i$ . Поэтому теорема Фурье очень эффективна и применяется часто в технике специально с целью *гармонического спектрального анализа* сигналов и токов. Для рассмотренного нами на рис.5.1(д) тока, например, функция формы тока  $I(t)$ , как функция времени была вычислена по формуле:

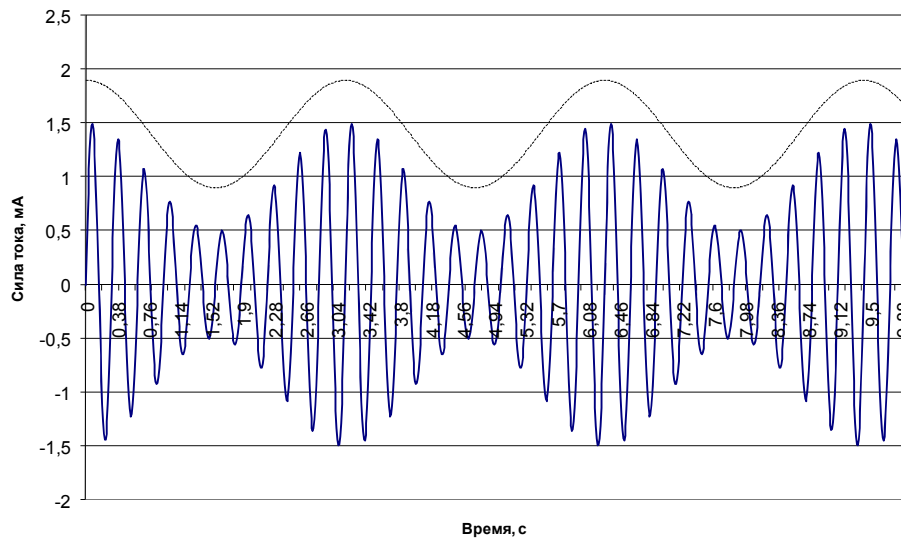
$$I(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega_1 t + \varphi) + a_2 \sin(\omega_2 t - \varphi) + a_3 \cos(\omega_3 t - \varphi), \quad (5.4)$$

где:  $a_0=0.65$ ,  $a_1=a_2=0.75$ ,  $a_3=0.5$ ,  $\omega_1=18.5$ ,  $\omega_2=21.5$ ,  $\omega_3=1.5$ ,  $\varphi=0.7$ ,  $t$  – время в секундах. При этом в разложении (5.4) все  $a_i$  называются *амплитудами гармоник*. Они были выбраны для расчетов с размерностью в мА. Все  $\omega_i$  называются *циклическими частотами гармоник* с размерностью «радиан/секунда», а  $\varphi$  – *фаза гармоник* (в данном случае одна общая для всех гармоник) с размерностью «радиан» (рад). Нулевая гармоника с амплитудой  $a_0$  фактически в данном примере означает среднюю постоянную составляющую тока, который в среднем течет в проводнике за все время действия тока (проверьте это по графику).

С помощью метода Фурье легко, также, описать физические характеристики и сложных модулированных токов, подобно изображенным на рис. 5.5. Такой *модулированный по амплитуде* ток описывается уравнениями модуляции, выбранными нами в виде:

$$\begin{aligned} I(t) &= a(t) \cdot \sin(\omega_1 t) \\ a(t) &= 1 + 0.5 \cdot \cos(\omega_2 t) \end{aligned}, \quad (5.5)$$

где: функция  $a(t)$  называется *амплитудой модуляции*, параметр  $\omega_1$  – *несущей частотой*,  $\omega_2$  – *частотой модуляции* (в расчетах использованы значения  $\omega_1=20$  рад/с,  $\omega_2=2$  рад/с). Для наглядности на графике модулирующий ток (частота модуляции) показан выше основного графика суммарного тока отдельной косинусоидой. Суммарный ток, соответственно, является суперпозицией медленно меняющегося модулирующего косинусоидального тока и более высокочастотного несущего тока, изменяющегося по закону синуса.



**Рис. 5.5.** Амплитудно-модулированный ток.

Если же вспомнить из школьного курса тригонометрии, что произведение синуса на косинус можно представить в виде суммы двух синусов, то наши уравнения (5.5) для тока в данном случае можно переписать, подставив одно в другое и раскрыв скобки, в виде:

$$I(t) = \sin(\omega_1 t) + 0.25 \sin[(\omega_1 - \omega_2) \cdot t] + 0.25 \sin[(\omega_1 + \omega_2) \cdot t]. \quad (5.6)$$

Как мы видим, в таком модулированном токе присутствуют три *частотные гармоники*:  $\omega_1$ ;  $(\omega_1 - \omega_2)$  и  $(\omega_1 + \omega_2)$ . Все становится достаточно просто для понимания, а главное – для последующих расчетов и анализа.

Величина модуляции несущего тока по амплитуде (то, насколько сильно периодически меняется амплитуда несущего тока в процентах к ее максимальному значению) характеризуется таким понятием, как *глубина модуляции*. Она, соответственно, измеряется в процентах, и для ситуации, изображенной на рис. 5.5, глубина модуляции составляет около 70%. Переменный ток рис.5.2 также мог бы быть нами рассмотрен как модулированный ток. В этом случае несущим являлся бы постоянный ток с амплитудой 1мА, а глубина модуляции составляла бы порядка 20%. Т.е. любые сложные токи можно с помощью теоремы Фурье рассматривать и как ам-

плитудно-модулированные токи, и как сумму токов с разными гармониками. С точки зрения физики и математики это одно и то же.

То же самое можно сказать и о *частотно-модулированных токах*. Есть такие в технике и физике токи, у которых для какой-либо  $i$ -ой гармоники не амплитуда меняется во времени, подобно второму уравнению (5.5), а круговая частота  $\omega_i$  является какой-либо функцией времени  $\omega_i = f_i(t)$  и может описываться разными сложными уравнениями. Это более сложные токи. В физиотерапии они встречаются много реже, но в быту мы сталкиваемся с ними довольно часто. Многие музыкальные радиопередачи в эфире, например, ведутся сегодня именно с частотной модуляцией для уменьшения помех и повышения качества звука. Любая мелодия, ведь, тоже представляет собой некую функцию  $I=f(t)$  изменения электрического тока в цепи звуковоспроизводящего устройства со временем. Используя эту функцию для модуляции частоты  $\omega_i$ , получим частотную модуляцию сигнала. Поэтому, когда по радио «Ретро», например, Вам говорят непонятное сочетание букв «FM», знайте: это произносят сокращенное английское “Frequency Modulation” – *частотная модуляция*.

Электрические цепи переменного тока имеют много особенностей по сравнению с электрическими цепями постоянного тока. До сих пор мы говорили, в основном, лишь об определениях различных физических величин, характеризующих переменные токи. Теперь коротко рассмотрим в чем, собственно, проявляются особенности физики процессов в электрических цепях переменного тока. В наибольшей степени это относится к формированию различных токов в цепях под действием приложенного к ним переменного напряжения, падению токов и напряжений на сопротивлениях в цепи, т.е. потере мощности в цепи, и прохождению через цепь различных частотных гармоник тока.

Как и в цепях постоянного тока, связь напряжения и тока в цепи переменного тока может быть описана законом Ома. Однако для цепи переменного тока закон Ома носит более общий характер (обобщенный закон Ома или *закон Ома для цепей переменного тока*). В цепях переменного тока сопротивление цепи в подавляющем большинстве случаев не является константой, а зависит от частоты протекающего по нему тока, т.е. является функцией частоты тока. Если по цепи протекает сложный модулированный ток, то сопротивление цепи может быть различно для разных его частотных гармоник. Тем не менее, мгновенное значение тока  $I(t)$  в цепи всегда будет определяться отношением мгновенного значения приложенного к цепи напряжения  $U(t)$  к общему сопротивлению в цепи  $Z(\omega)$ :

$$I(t) = U(t) / Z(\omega) , \quad (5.7)$$

где  $Z(\omega)$  называется также *полным (или комплексным) сопротивлением* цепи. Оно зависит уже от частоты тока  $\omega$ <sup>50</sup>.

Как следует из (5.7), при одном и том же приложенном напряжении ток в цепи может быть как маленький, так и большой в зависимости от  $Z(\omega)$ . Поэтому, скажем, такое встречающееся в физиотерапии название переменного тока как «ток высокого напряжения», особенно часто упоминаемое при описании процедур дарсонвализации<sup>51</sup>, не является в физике корректным. Один и тот же ток может быть создан как высоким, так и низким напряжением. Просто в начале XX века переменные токи еще не умели создавать с помощью обычных генераторов переменного тока и в качестве источников тока использовали высоковольтные конденсаторы, разряжая их с помощью разрядников на присоединенную к ним цепь. Во время разряда в цепи появлялись всплески тока, которые и являлись действующим физическим фактором при ранних процедурах дарсонвализации. Но теперь-то мы знаем, что, согласно все той же теореме Фурье, любые всплески токового разряда в цепи могут быть представлены как разные гармоники обычного переменного тока, так что никаких особых токов «высокого напряжения» в природе не существует. Ток определяется мгновенными значениями напряжений, их частотным спектром и сопротивлением в цепи.

А что же конкретно в цепи переменного тока зависит от частоты  $\omega$ ? От частоты зависят отдельные составляющие *полного сопротивления*, в частности - так называемые *индуктивное* и *емкостное сопротивления* цепи. Дело в том, что любые подвижные заряды в любой среде, которые и создают ток в среде за счет своего движения, обладают как все материальные тела определенной *инертностью* к движению. В общем случае, чем выше частота приложенного к цепи напряжения, тем сложнее инертным телам (зарядам) разогнаться и тормозить внутри среды, повинувшись навязанным им извне периодам колебаний. Правда, любая материальная среда – это еще и очень сложная упругая механическая система, в которой, как правило, есть и собственные резонансные частоты. При резонансе амплитуда колебаний, как известно, возрастает, т.е. при некоторых особых частотах, или, даже, внутри целых частотных диапазонов заряды могут двигаться намного быстрее, чем в других диапазонах за счет уменьшения механического сопротивления движению зарядов со стороны материальной среды. Одним словом, здесь проявляется

---

<sup>50</sup> Для так называемых нелинейных сред  $Z(\omega)$  может зависеть также и от амплитудной величины напряжения или тока. Такие среды часто встречаются в физике, но очень редко о них вспоминают и говорят в физиотерапии, хотя, не исключено, что для каких-то отдельных частот и величин напряжений и токов биологические ткани могут являться нелинейной средой распространения тока.

<sup>51</sup> **Д' Арсонваль** (J.-A. d'Arsonval) – французский физиолог и физик, предложивший в 1892г. использовать импульсный ток с лечебными целями.

целая палитра различных физических явлений, и заранее предсказать для сложной материальной среды, с какими частотами и какой по амплитуде потечет по цепи ток, весьма сложно.

Диэлектрическая и магнитная проницаемости среды ( $\varepsilon$  и  $\mu$ ), о которых шла речь в разделах электро- и магнитостатики, при наличии переменного тока выступают уже в качестве сложных функций частоты  $\varepsilon(\omega)$  и  $\mu(\omega)$ . А от них зависят все сопротивления, емкости и индуктивности в цепи. Поэтому и полное сопротивление в цепи будет для переменного тока уже весьма сложной функцией. В современной электротехнике и радиоэлектронике, правда, давно научились выбирать материалы для элементов цепи, для которых эта зависимость не столь существенна в определенном диапазоне частот. Поэтому в практических расчетах электрических цепей формулы для расчета полного сопротивления цепи не так сложны. Но и в них проявляется эта частотная зависимость. Обычно при инженерных расчетах полного сопротивления цепи используется формула:

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}, \quad (5.8)$$

где:  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость цепи, часто принимаемые как константы, а  $R$  называется *активным сопротивлением* в цепи и соответствует сопротивлению цепи постоянному току. Слагаемое же в скобках под знаком корня называется *реактивным сопротивлением* цепи и представляет собой разницу между *индуктивным* и *емкостным* сопротивлениями в цепи. Именно они и вносят основную зависимость от частоты в расчетные формулы определения мгновенного значения тока в цепях с переменным током.

Из выражения (5.8) можно заметить, что полное сопротивление цепи имеет минимум, равный  $R$ , если индуктивное и емкостное сопротивления будут равны друг другу (слагаемое в скобке в этом случае обращается в 0). Тогда, как раз, и говорят, что проявляется так называемый *частотный резонанс* в цепи. Ток при этом в цепи, естественно, становится максимальным. Из (5.8) легко можно явно выразить значение частоты, для которой будет наблюдаться в цепи частотный резонанс и произойдет резонансное уменьшение полного сопротивления и соответствующее резонансное увеличение мгновенного значения тока в цепи. Найдем это выражение. Приравняем емкостное и индуктивное сопротивления в (5.8):

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Перенесем частоту  $\omega$  в левую часть уравнения, а индуктивность  $L$  – в правую. Извлекая после этого корень из обеих частей уравнения, легко получить для искомой круговой частоты:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Или, для обычной частоты колебаний  $\nu$  (см. выражение (1.11)):

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (5.9)$$

которая в физике часто именуется Томсоновской<sup>52</sup> частотой резонанса. Эта формула характеризует частоту, на которой возникает резонанс колебаний переменных токов в *колебательном контуре*<sup>53</sup>. Не столь важна для физиотерапевта сама формула (5.9), сколько понимание принципа возникновения резонанса при колебаниях тока в цепи. Любая биологическая система, ткань, орган, клетка ткани и т.д. представляет собой сложную систему активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей с точки зрения теории электричества. Протекание переменного тока по такой цепи может приводить к целому ряду резонансных процессов и явлений на уровне отдельных участков тканей, клеток или молекул (по крайней мере, с точки зрения теоретической физики). Но этот вопрос сегодня очень плохо изучен в части практических приложений резонансных явлений в медицине, выявления показаний и противопоказаний к ним, предсказаний ближайших и отдаленных последствий их проявления в каждом конкретном случае для каждого конкретного пациента...

Мощность в цепи переменного тока (точнее: *мгновенная мощность* в цепи переменного тока) определяется произведением мгновенных значений переменного тока и напряжения для одного и того же выбранного момента времени  $t$ :

$$W(t) = I(t) \cdot U(t). \quad (5.10)$$

Наличие реактивных сопротивлений в цепи, как правило, приводит к сдвигу фаз колебаний напряжения и тока в цепи, поэтому вычисление мгновенной мощности в цепях переменного тока – задача весьма не простая. Часто ее решают путем разбиения мощности на активную и реактивную составляющие – на мощности, выделяемые в цепи (потребляемые в цепи) отдельно активными ( $R$ ) и реактивными ( $\omega L$  и  $1/\omega C$ ) сопротивлениями соответственно. При этом активная мощность измеряется, как и для цепей постоянного тока, в ваттах (Вт), а единицей измерения реактивной мощности является хитрая величина «*вольт-ампер реактивный*» (вар). Но, к счастью, все расчеты за физиотерапевтов делают физики и инженеры, поэтому столь детальные подробности врачам не так уж и важны. Кроме того, часто все расчеты сводят к нахождению полной мощности в цепи через действующие значения токов и напряжений, что намного проще. По определению *полная мощность* – это произведение действующих значений напряжений

<sup>52</sup> **Вильям Томсон** (1824-1907), он же **лорд Кельвин** – знаменитый ирландский физик. Стал студентом Глазговского университета в 10 лет (!). В 12 лет вышла его первая научная работа по теории теплопроводности, а 22 года он стал уже известным профессором вышеназванного университета.

<sup>53</sup> *Колебательный контур* – электрическая цепь, состоящая из соединенных параллельно индуктивности и емкости. При данной частоте, если в цепи нет активного сопротивления  $R$ , полное сопротивление цепи становится равным нулю, и колебания тока в таком контуре могут, теоретически, продолжаться бесконечно долго с максимально возможной амплитудой.

$U$  и тока  $I$  в цепи, поэтому расчет полной мощности аналогичен формуле (3.4). Отличие только в размерности величин. Полная мощность в цепи переменного тока измеряется в «вольтамперах» и обозначается в технической документации на приборы сокращенно «В·А» или просто «ВА». В этом основное отличие. Если же реактивная компонента мощности мала по сравнению с активной компонентой, значение полной мощности будет близко к значению потребляемой цепью активной мощности (Вт).

Но самое, все же, уникальное отличие цепей переменного тока от цепей с постоянным током заключается в возникновении вокруг проводника с переменным током *переменного магнитного поля*. Представьте себе движущийся заряд  $q$ . Согласно теории постоянного тока и постоянного магнитного поля, вокруг заряда, движущегося с постоянной скоростью вдоль прямой линии, формируется вихревое магнитное поле, как было изображено на рис. 4.3. Собственно, в этом была суть открытия Эрстеда в 1819г. Однако если заряд будет двигаться с переменной скоростью в проводнике с током, вокруг такого проводника магнитное поле по своей абсолютной величине будет меняться во времени. Если же при движении заряда будет еще и периодически меняться направление его движения на противоположное, магнитное поле вокруг такого заряда станет «знакопеременным»: направление силовых линий магнитного поля в пространстве начнет периодически меняться на противоположное в такт с изменением направления движения заряда. Сложный динамический характер электрического тока будет порождать сложное динамическое магнитное поле. Это очень интересное явление. Не случайно после сообщения в 1820г. об открытии Эрстеда десятки, если не сотни экспериментаторов ринулись повторять его опыты и придумывать все новые и новые демонстрации причудливых порождений электрическими токами магнитного поля. Но только М.Фарадей в своем дневнике в 1821г. сделал для себя, на первый взгляд, простенькую рабочую пометку, которая и определила все дальнейшее развитие всей электродинамики: «Превратить магнетизм в электричество». На решение этой задачи у Фарадея ушло около 10 лет.

Вроде бы задача была очевидной и не такой уж и сложной. Раз ток порождает магнитное поле, почему не может быть наоборот? Фарадей экспериментировал с разными устройствами: располагал сильный магнит рядом с медной проволокой, соединенной с гальванометром, и пытался зарегистрировать ток в проволоке при помощи гальванометра<sup>54</sup>; использовал вместо постоянного магнита небольшую катушку с постоянным током для создания постоянного магнитного поля около медной проволоки и т.д. Но все было тщетно. Постоянное магнитное поле не порождало ток в проводе. И только 29 августа 1831г.<sup>55</sup>, смастерив устройство, состоящее из

<sup>54</sup> Ныне такие приборы называются амперметрами (миллиамперметрами, микроамперметрами и т.д.)

<sup>55</sup> Редкий случай в истории физики, когда точно известен день величайшего открытия.



двух больших катушек с витками из медной проволоки, намотанных на один деревянный каркас (прообраз современных трансформаторов), ему удалось совершить задуманное. Одна из катушек замыкалась на источник напряжения – вольтов столб, т.е. служила источником магнитного поля, а вторая подсоединялась к гальванометру. Фарадей замыкал и размыкал ток в первой катушке и наблюдал отклонение стрелки гальванометра. В момент замыкания и размыкания цепи он обнаружил резкие единичные отклонения стрелки гальванометра, причем в моменты замыкания и размыкания цепи стрелка гальванометра отклонялась от положения нуля в разные стороны. А как только в цепи первой катушки устанавливался режим постоянного тока, стрелка гальванометра неизменно возвращалась на нулевую отметку<sup>56</sup>. Вскоре опыт был повторен и с постоянным магнитом, который вводился внутрь катушки с проводом. Непосредственно в момент движения магнита внутри катушки в катушке фиксировались всплески тока<sup>57</sup>. Так был сделан вывод, что для наведения тока в проводнике необходимо изменяющееся во времени магнитное поле. Возникновение тока в цепи в этих экспериментах Фарадей назвал явлением *индукции тока*.

Сегодня, имея представление о других законах и явлениях электричества и магнетизма, можно явление возникновения электромагнитной индукции объяснить многими разными способами. Например, если расположить и двигать прямой металлический проводник со скоростью  $v$  поперек силовых линий магнитного поля, которое создано постоянным магнитом, можно также в проводе обнаружить движение зарядов, т.е. электрический ток. В данном случае в качестве э.д.с. индукции выступает сила Лоренца (см. формулу (4.4)), которая действует на свободные заряды в движущемся проводнике (электроны), как бы выталкивая их из магнитного поля магнита вдоль по проводнику к его концам.

После открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции развитие электродинамики и общей теории электромагнетизма еще больше ускорилося. Однако окончательный и современный физико-математический вид теория электромагнитного поля приобрела только после

---

<sup>56</sup> В первые моменты времени сразу после замыкания или размыкания цепи в катушке с током происходят переходные процессы, и ток не является постоянным. В частности, это связано и с тем самым явлением, которое и исследовал Фарадей – явлением электромагнитной индукции: возникающий ток в катушке создает магнитное поле, которое, в свою очередь, создает ток не только во второй, но и в этой же самой, первой катушке, причем этот наведенный ток направлен в противоположную сторону (имеет другой знак). Он как бы препятствует появлению тока в катушке, что и «затягивает» процесс появления тока во времени.

<sup>57</sup> Вне зависимости от таланта Фарадея только случайность помешала открыть это явление раньше другому физика – швейцарцу Колладону. Он также пытался получить электрический ток в катушке с проводом, вдвигая внутрь катушки постоянный магнит. Понимая, что эффект наведения тока в катушке может быть мал, чтобы магнит не оказывал непосредственного влияния на стрелку гальванометра Колладон вывел концы катушки с гальванометром в другую комнату. Вставив магнит в катушку в одной комнате, он шел в другую комнату смотреть на гальванометр и каждый раз убеждался, что стрелка прибора неподвижно стоит на нуле. Судьба оказалась к Колладону не столь благосклонна как к Фарадею...

работ Дж. Максвелла<sup>58</sup>. Он сумел объединить все законы электростатики, магнитостатики, электрического тока и переменного магнитного поля в одну единую теорию. Теория Максвелла очень красива, но, к сожалению, сами уравнения теории – знаменитые *уравнения Максвелла* – достаточно сложны для изложения на элементарном уровне. Они записываются в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных от комплексных векторных величин, так что даже студенты физико-технических специальностей вузов тратят не один месяц на их понимание и изучение. Тем не менее, можно попытаться обычными словами выразить основную суть теории Максвелла в объеме, достаточном для базовых знаний врача-клинициста.

Согласно теории Максвелла, изменения в среде пространственной конфигурации электрического поля порождаются изменением во времени магнитного поля. Изменения же в среде пространственной конфигурации магнитного поля порождаются как изменением во времени электрического поля (токами смещения), так и обычным током проводимости. Источниками в среде электрического поля являются электрические заряды, как и в законе Кулона, а вот источников магнитного поля (магнитных зарядов, или, как их еще называют, магнитных монополей) в природе не существует. Общее электромагнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами, но если просто движущийся с постоянной скоростью электрический заряд порождает стационарное магнитное поле, то заряд, движущийся с ускорением, и, в частности, колеблющийся в пространстве заряд (при колебаниях заряд постоянно то разгоняется, то тормозит и меняет направление своего движения на противоположное), порождает переменное электромагнитное поле. В этом переменном поле отдельно его электрическая и магнитная составляющие как бы постоянно порождают друг друга в пространстве, поэтому поле может распространяться на большие расстояния от места расположения источника. При очень малых ускорениях и медленных колебаниях зарядов поле в пространстве практически неотличимо от соответствующих стационарных электростатического и магнитостатического полей. Если же ускорение зарядов резко возрастает, это приводит к резким «всплескам» электромагнитного поля в пространстве около заряда. Поскольку при изменении электрической и магнитной составляющих поля они взаимно снова порождают друг друга, но на расстоянии чуть дальше от источника, весь «всплеск» или импульс поля плавно перемещается в пространстве как единое целое. Так порождается и перемещается в пространстве *электромагнитная волна*.

Наглядно представить себе распространение электромагнитной волны можно с помощью изображения изменения силовых линий магнитного и электрического поля (**E** и **H**) в простран-

---

<sup>58</sup> **Джемс Клерк Максвелл** (1831-1879) – выходец из знатного шотландского рода. Один из наиболее выдающихся физиков мира. Его теория по значимости стоит в одном ряду с теориями Ньютона и Эйнштейна. Она определила все последующее развитие всей физики, радиофизики и электроники вместе взятых на все последующие более чем 100 лет. Однако среди врачей и простых обывателей он, видимо, незаслуженно наименее известен как великий физик.

стве (рис.5.6). Эти линии в общем случае однородной и изотропной диэлектрической среды перпендикулярны направлению распространения волны и перпендикулярны друг другу, т.е. электромагнитная волна является волной поперечных колебаний векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  в пространстве.

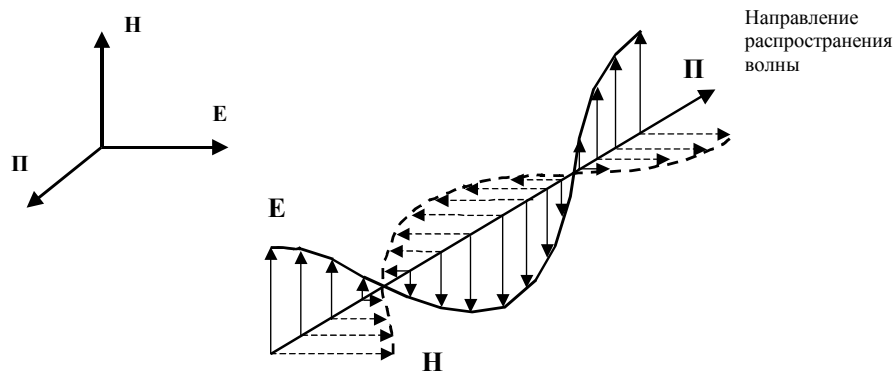


Рис. 5.6. Электромагнитная волна в диэлектрической среде (вакууме).

Плоскость колебаний вектора  $\mathbf{E}$  определяет так называемую плоскость *поляризации* электромагнитной волны. Это очень важное понятие. Поляризованной считается волна, у которой есть какое-либо одно выделенное направление (плоскость), в котором преимущественно и совершает колебания вектор  $\mathbf{E}$ . Если он все время совершает колебания в одной и той же плоскости, как бы вдоль одной прямой линии, как показано на рис.6.6, то говорят, что волна *линейно поляризована*. Бывают случаи, когда вектор  $\mathbf{E}$  по пути своего распространения меняет плоскость поляризации. Например, он может в пространстве закручиваться подобно штопору. Тогда говорят о *круговой поляризации* волны. Если же вектор  $\mathbf{E}$  произвольным образом (хаотически) во времени меняет свою плоскость поляризации, такая волна считается не поляризованной. Но в любом случае вектор  $\mathbf{H}$  при этом будет в вакууме всегда в каждый конкретный момент времени оставаться перпендикулярным вектору  $\mathbf{E}$ , т.е. он также будет менять свою плоскость колебаний (плоскость поляризации), следуя за  $\mathbf{E}$ .

В последнее время, отметим, в физиотерапии стали появляться приборы, создающие некое «вращающееся магнитное поле»<sup>59</sup>. Сложно сказать, что под этим подразумевают разработчики в каждом конкретном случае, но можно предположить, что такой прибор создает обычное электромагнитное поле с медленно вращающейся во времени плоскостью поляризации волны и, в частности, плоскостью колебаний вектора  $\mathbf{H}$ .

<sup>59</sup> Всегда помните, что согласно основным положениям теории Максвелла, любое изменение во времени магнитного поля приводит к возникновению электрического поля и наоборот, т.е. в таких случаях всегда возникает полноценная электромагнитная волна. Нельзя создать прибор, генерирующий отдельно только переменное электрическое или отдельно только переменное магнитное поле.

Электромагнитная волна, как и любой другой волновой процесс, может характеризоваться скоростью своего распространения  $\nu$ , частотой колебаний ( $\omega$  или  $\nu$ ), периодом колебаний  $T$  и длиной волны в пространстве  $\lambda$  (вспомните формулу (1.16) и раздел звуковых механических волн и). Она также несет с собой и энергию поля, но для практических задач медицины удобнее характеризовать электромагнитную волну через ее поверхностную плотность мощности, т.е. *энергию излучения, удельную во времени и, одновременно, удельную по площади поверхности*<sup>60</sup>, на которую эта волна падает:

$$\mathbf{\Pi} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \quad , \quad (5.11)$$

где:  $\mathbf{\Pi}$  – вектор<sup>61</sup> (мгновенное значение) поверхностной плотности мощности электромагнитной волны (Вт/м<sup>2</sup>), а в квадратных скобках указана операция векторного перемножения векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ . Тройка векторов  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{\Pi}$  образуют правую тройку векторов, как показано на рис. 5.6. В практических расчетах для определения мощности, которая падает на площадку  $S$ , надо модуль вектора  $\mathbf{\Pi}$  по (5.11) умножить на площадь поверхности  $S$  и найти среднее значение этого произведения за период колебаний волны. Не вдаваясь в подробности, подскажем сразу, что модуль среднего значения вектора  $\mathbf{\Pi}$  можно найти через модули векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  следующим образом:

$$P = \frac{1}{2} E^2 \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} = \frac{1}{2} H^2 \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} \quad . \quad (5.12)$$

Чтобы лучше понять эти формулы, определим, в качестве расчетной задачки, какую поверхностную плотность мощности создает электромагнитная волна в вакууме (воздухе) с действующим значением, например,  $E=100$  В/м. Это примерно та фоновая напряженность электростатического поля, которую создает наша планета Земля. Для вакуума (и воздуха с большой степенью точности) относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды  $\varepsilon=\mu=1$ , поэтому сразу из первого равенства (5.12):

$$P = \frac{1}{2} \cdot 100^2 \cdot \sqrt{\frac{8.85 \cdot 10^{-12}}{4\pi \cdot 10^{-7}}} \approx 13.3 \quad \text{Вт/м}^2 \quad . \quad (5.13)$$

Как видим, получилась не такая уж и маленькая плотность мощности - порядка 1.3 мВт/см<sup>2</sup>.

Для любых изотропных (однородных) сред из (5.12) следует, что модули векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  связаны между собой простым соотношением:

$$E \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = H \sqrt{\mu\mu_0} \quad . \quad (5.14)$$

<sup>60</sup> Слово «удельная» означает в физике «на единицу чего-то» или «в единицу чего-то». В данном случае имеется в виду «в единицу времени» и на «единицу площади поверхности».

<sup>61</sup> Вектор  $\mathbf{\Pi}$  называется в классической электродинамике вектором Пойтинга, а во многих русскоязычных (советских) руководствах – вектором Умова-Пойтинга.

Поскольку в физиотерапии более употребительной величиной является вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , с учетом формулы (4.1) соотношение (5.14) можно переписать в виде:

$$E\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} = B, \quad (5.15)$$

где  $B$  – модуль вектора магнитной индукции (Тл). Вычислим, как продолжение примера, какую же магнитную индукцию создает в вакууме (воздухе) указанная выше электромагнитная волна с  $E=100$  В/м:

$$B = 100 \cdot \sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = 100 \cdot \sqrt{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \approx 3.3 \cdot 10^{-4} \text{ мТл}.$$

Как мы видим, полученное расчетное значение существенно меньше обычно используемых в физиотерапии значений магнитной индукции. Это говорит о том, что обычная электромагнитная волна, даже с такой плотностью мощности как в (5.13), т.е.  $1.3 \text{ мВт/см}^2$ , не может создать значений магнитной индукции, которые обычно приняты в практике физиотерапии<sup>62</sup>. Следовательно, механизм взаимодействия электромагнитных волн с биологическими тканями должен быть несколько иным, нежели при взаимодействии биотканей отдельно с электростатическим и магнитостатическим полями. Основной особенностью динамического электромагнитного поля, по сравнению со статическими полями, является перенос энергии электромагнитной волной по (5.11)-(5.12). Постоянные же электрические и магнитные поля, обладая собственной энергией поля, не осуществляют ее перенос в пространстве.

Из уравнений Максвелла следует, что скорость распространения электромагнитной гармонической волны (и скорость переноса энергии соответственно) в любой изотропной материальной среде можно определить по формуле:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}. \quad (5.16)$$

Для вакуума эта скорость точно определяется введенными двумя фундаментальными физическими константами  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ , т.к.  $\varepsilon=\mu=1$ . Удивительно, но она численно оказалась в точности равной скорости света « $c$ »:

$$v_{\text{вакуум}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = c. \quad (5.17)$$

Попробуйте убедиться в этом и вычислить ее самостоятельно. С учетом (6.16), кстати, соотношение (5.15) приобретает очень простой, понятный и легко запоминаемый вид:

$$E = B \cdot v. \quad (5.18)$$

<sup>62</sup> Физиотерапевтические приборы создают сильные магнитные поля за счет постоянных или специальных электромагнитов.

Это соотношение справедливо для любых случаев однородных и изотропных материальных сред, если рассматривается, конечно, единая электромагнитная волна, а не отдельно электростатическое и магнитостатическое поля.

В материальной среде при обычных условиях скорость распространения электромагнитной волны будет меньше скорости света в вакууме, т.е.  $v < c$ . Отношение этих скоростей по определению называется *коэффициентом преломления* среды « $n^*$ ». Это безразмерная величина, определяемая из (5.16) и (5.17) как:

$$n^* = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (5.19)$$

Именно коэффициентом преломления определяются все свойства и особенности материальной среды по взаимодействию с электромагнитной волной.

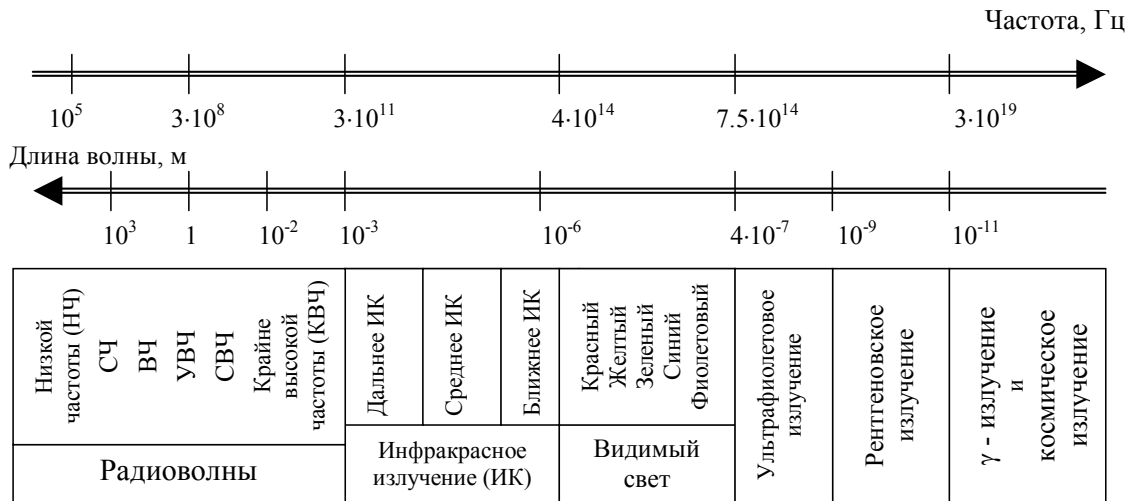
В общем случае однородной проводящей среды коэффициент преломления является сложной (*комплексной*) функцией диэлектрических и электропроводных свойств среды. Мы не будем здесь вводить особое математическое понятие *комплексных величин*, хотя оно и очень эффективно в некоторых задачах электродинамики. Просто запомните, что если материальная среда является идеальным диэлектриком (изолятором), то  $n^* = n$  – обычная действительная величина, определяемая по (5.19) через действительные величины  $\epsilon$  и  $\mu$ . Если же среда хоть в малейшей степени является проводником, то коэффициент преломления  $n^*$  представляет собой уже, условно, сложную комплексную сумму действительного слагаемого  $n$  и некоторого «мнимого» слагаемого  $\sigma$ , прямо пропорционального электропроводности среды. Выражение (5.19), при этом, все равно остается справедливым, просто  $\epsilon$  в нем становится тоже комплексной величиной. Но это уже не так и важно. Важно здесь то, что при  $\sigma = 0$  среда называется идеальным диэлектриком и не поглощает электромагнитной энергии, которая через нее проходит. Идеальные диэлектрики просто пропускают через себя электромагнитную волну без потерь энергии. Потери же электромагнитной энергии происходят только в реальных, проводящих ток средах. А все биологические ткани, особенно жидкости, как раз и являются реальными материальными средами, в той или иной степени проводящими электрические токи.

В предыдущих разделах физики при упоминании потерь энергии в среде мы оперировали такими понятиями, как сопротивление или импеданс среды (вспомните формулы (1.14), (3.4) или (5.8)). Здесь, в электродинамике, тоже по аналогии с другими разделами вводится понятие импеданса среды, который определяет свойства среды «сопротивляться» прохождению сквозь нее электромагнитной волны. Импеданс среды  $Z$  определяется выражением:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} \quad (5.20)$$

и измеряется он в «омах», как и сопротивление в электрических цепях. Приятно иногда обнаружить уже хорошо знакомые понятия в новых и достаточно сложных разделах физики! Для вакуума при  $\varepsilon=\mu=1$  импеданс равен примерно 377 Ом (проверьте это расчетами). Все другие среды имеют, как правило, меньший импеданс, т.к. обычно  $\varepsilon>\mu$ . Так что в электродинамике есть некоторая особенность в определении импеданса. Поэтому часто в теории электромагнетизма импеданс называют еще *волновым сопротивлением* среды, в отличие от обычного электрического сопротивления проводников с током. Волновое сопротивление отвечает за поглощение энергии электромагнитных волн в среде. Проходя материальную среду, электромагнитные волны наводят в ней электрические токи и магнитные поля. Электрические токи испытывают сопротивление среды, магнитные поля ослабляются (усиливаются) и энергия волны, в общем случае, теряется в среде. Происходит, например, нагрев среды. Это тоже сегодня всем хорошо известное следствие уравнений Максвелла. Принцип действия СВЧ печей для разогрева пирожков основан именно на этом явлении. Это же явление положено и в основу физиотерапевтического действия процедур УВЧ-терапии.

Импеданс среды, вследствие частотной зависимости параметров среды  $\varepsilon$  и  $\mu$ , является также функцией частоты колебаний электромагнитной волны  $\nu$ . Поэтому волны разной частоты по-разному взаимодействуют с материальной средой и имеют разную способность распространяться в окружающем пространстве. Это проявляется разными физическими свойствами волн с разной частотой. Для удобства восприятия сегодня весь мыслимый *частотный диапазон электромагнитных волн* условно разделен на ряд поддиапазонов, имеющих свои обособленные названия и сгруппированных по признакам их восприятия человеком или специфического их использования в технике, причем у этих поддиапазонов нет физически обусловленных четких границ. Границы придуманы человеком. Теория Максвелла утверждает, что все существующие в природе излучения, от радиоволн до рентгеновского и гамма-излучения, суть одно и то же физическое явление. Все это - электромагнитные волны с разной частотой колебаний  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ , которые связаны между собой соотношением (1.16). Поэтому и появилась возможность классификации всех электромагнитных излучений по единой шкале, упрощенно изображенной на рис.5.7.



**Рис. 5.7.** Шкала электромагнитных волн.

Одно из самых замечательных следствий теории Максвелла, помимо теоретического предсказания существования радиоволн и теоретического обоснования скорости их распространения, является доказательство электромагнитной природы света. Свет, как всем сегодня хорошо известно, суть тоже электромагнитная волна, но более высоких, чем радиоволны частот. Об этом мы и поговорим в следующем разделе, тем более, что рассматривать особенности физики взаимодействия электромагнитных волн с веществом с точки зрения практических задач физиотерапии проще, нагляднее и удобнее именно на примере световых явлений.



## Глава 6. Свет как электромагнитная волна

---

Нет, пожалуй, в природе более красочного, удивительного, многообразного и противоречивого физического явления, чем свет. Световые (или как их еще называют оптические) явления составляют предмет изучения очень большого числа разделов в современной физике. Можно выстроить из них целый длинный ряд: фотометрия, геометрическая оптика, оптическая спектроскопия, нелинейная оптика, квантовая оптика и т.д. Свет несет нам самую богатую информацию о свойствах окружающего мира. С первых дней своего рождения человек сталкивается со светом и практически всю жизнь, если здоров, пользуется двумя уникальными оптическими приборами - своими глазами. Однако этого бы не произошло, если бы все пространство вокруг нас не было пронизано светом.

Основной световой поток на Земле образуется за счет излучения Солнца. Солнце, как естественный источник света и тепла, всегда привлекало внимание человека. С ним связано много легенд, а в Древнем мире ему поклонялись как Богу. На многочисленных барельефах Египетского Фараона **Аменхотепа IV** (Эхнатона, мужа Нефертити) он изображен под лучами, исходящими от Бога Солнца Атона, держащего знак жизни. Луна и звезды – тоже определенные естественные источники света для Земли, правда «холодные». Первыми же искусственными источниками света для человека были свечи, факела и костер, от которых человек, как и от Солнца, мог получать не только свет, но и тепло. Последнее обстоятельство позволяло людям уже в древние времена проводить простейшие лечебные процедуры с их помощью. Первым врачом, в трудах которого можно найти упоминание о целебной силе солнечного света и тепла, был **Гиппократ**. Более подробно о благотворительном влиянии солнечного света и тепла на человека писали древние врачи **Гален** и **Авиценна**. В средние века французский врач **Фор** опубликовал серьезный научный труд по лечению трофических язв ног солнечным светом, а в конце XIX в. датский физиотерапевт **Н.Финсен** доказал возможность лечения туберкулеза кожи (волчанки) и кожной оспы ультрафиолетовым и красным светом соответственно, за что в 1903г. получил Нобелевскую премию по медицине.

Наиболее ранние, известные сегодня, научные попытки систематически описать оптические явления с точки зрения физики связаны с именем греческого философа **Емпидокла** и относятся к 490-430 гг. до н.э. Древние греки ввели понятие лучей света и считали, что лучи исходят из глаз людей. Именно так понимали они выражение "свет очей". И только **Аристотель**, ученик **Платона**, высказал предположение, что свет - это нечто, попадающее в глаза. О прямолинейности распространения света на основе повседневного опыта писал основатель геометрии **Евклид**. Но все это были лишь первые, робкие шаги в познании физической сути и разносторонних свойств света.

Естественно, первоначально людьми были замечены самые явные, бросающиеся в глаза оптические явления, но их начальное толкование не всегда полностью и сразу соответствовало истине. Так из повседневного жизненного опыта люди давно знали о явлении отражения света, неразрывно связанного в сознании простого человека с понятием зеркала, хотя отражать свет может и не только зеркало. В этом явлении интуитивно кажется, что луч света отражается от «зеркала» подобно мячику, отскакивающему от стены (рис. 6.1).

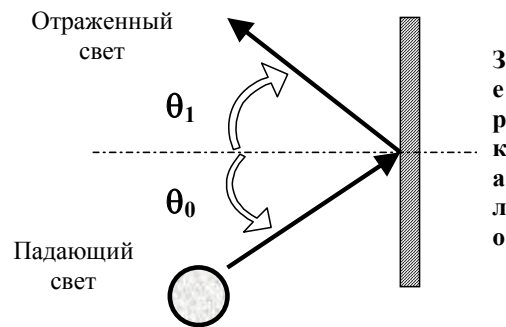


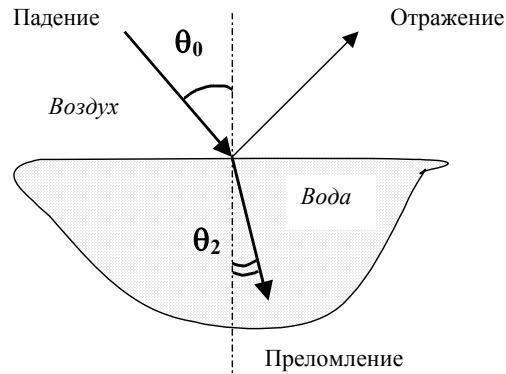
Рис. 6.1. Отражение света от зеркала

При этом угол падения света  $\theta_0$  оказывается в точности равен углу отражения  $\theta_1$ . Может быть, такая аналогия и породила у древних представление о свете, как о потоке маленьких шариков - частиц света. Тогда объяснить закон отражения можно чисто логическими рассуждениями, что свет всегда выбирает по времени самый кратчайший путь для своего движения (принцип наименьшего времени **Герона-Ферма**<sup>63</sup>). Такой подход к пониманию природы света называется сегодня *корпускулярной теорией света*. Он долго господствовал в науке, и у него существовало очень много последователей, вплоть до великого Ньютона. О корпускулярной теории подробнее мы поговорим в следующем разделе, а пока скажем, что в более полном виде закон отражения и преломления света на границе раздела сред был сформулирован в 1621г. голландцем **В.Снеллиусом**<sup>64</sup>. Он изучал падение луча света на поверхность воды и сумел точно определить соотношение углов падения, отражения и преломления излучения на границе воздух-вода.

<sup>63</sup> Того самого французского математика **Пьера Ферма** (1601-1665), который загадал людям очень сложную задачку в виде своей Последней или Великой теоремы (теоремы Ферма). Более 350 лет искалось ее доказательство, но только в 1995г. профессору Принстонского университета **Эндрю Уайлсу** удалось доказать теорему, правда при помощи очень сложной теории «модулярных кривых» (за что ему по праву в 1996г. была присуждена обещанная премия Вольфскеля). Элементарное же доказательство этой теоремы, полученное Ферма, до сих пор так и не найдено...

<sup>64</sup> В.Снеллиус умер в 1626г. не опубликовав своего открытия. Рене Декарт описал впервые этот закон без ссылки на Снеллиуса в своей «Диоптрике», хотя, как считают историки, Декарт был знаком с рукописью Снеллиуса.

Если рассмотреть падение узкого пучка света на воду, можно легко заметить, что небольшая часть света будет отражаться от ровной поверхности воды, подобно картинке, изображенной на рис.6.1. Основная же часть света в виде того же узкого пучка, если поверхность воды будет гладкая, пройдет внутрь воды, правда угол распространения света в воде будет отличным от первоначального угла падения света на воду (рис. 6.2).



**Рис. 6.2.** Явление преломления света на границе воздух-вода.

Соотношение для этих углов, как установил Снеллиус, может быть записано в виде:

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_2} = n , \quad (6.1)$$

где  $n$  – относительный показатель преломления света для воды по отношению к воздуху. Снеллиус, конечно, не знал тогда теории Максвелла и не мог предвидеть, что  $n$  может легко определяться формулой (5.19) и является показателем отношения скоростей распространения волнового процесса в двух этих материальных средах. Но его закон и без этого оказался очень плодотворным. Уже тогда люди умели плавить стекла и изготавливать простейшие оптические приборы – лупы, подзорные трубы и т.п. *Закон Снеллиуса* позволил развить теорию оптических приборов и дал людям в руки математический аппарат для точного расчета хода лучей в таких приборах. Зная закон Снеллиуса, стало возможным представить, например, увеличительную стеклянную двояко выпуклую линзу в виде набора маленьких призм. Поскольку свет при прохождении призмы преломляется дважды, на каждой из ее граней, объяснить ход лучей в призме и увеличительном стекле оказалось совсем не сложно. Взгляните на рис.6.3 и вам все станет ясно, как Снеллиусу. При выходе из более оптически плотной среды (стекла) в менее оптически плотную среду (воздух), относительный коэффициент преломления света становится, соответственно, меньше единицы, и луч еще сильнее отклоняется от нормали к поверхности. При определенных углах может даже произойти так называемое явление *полного внутреннего отражения*, когда преломленный луч не выйдет из плотной среды, а все излучение просто отразится обратно от границы раздела сред и уйдет обратно внутрь более плотной среды. Если же крити-

ческий угол полного внутреннего отражения не достигается, то лучи света будут сильно отклоняться от направления своего первоначального распространения. Для симметричной выпуклой линзы это приведет к тому, что первоначально параллельные лучи света сойдутся после линзы в одной точке, называемой *фокусом линзы*. Это, хочется надеяться, все помнят из школьного курса физики.

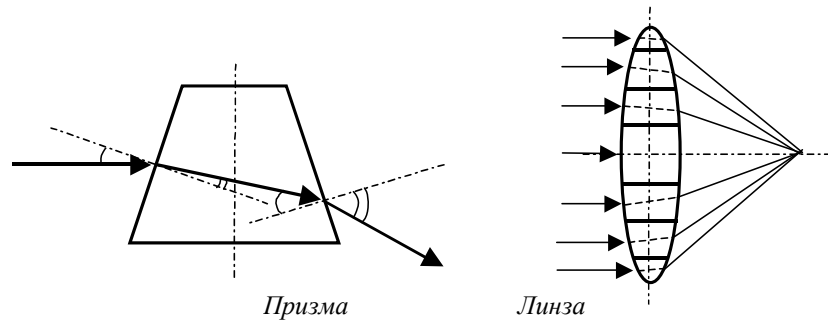


Рис. 6.3. Ход лучей в стеклянной призме и двояко выпуклой линзе.

Поскольку ход лучей в таких простейших оптических системах можно изображать геометрически в виде чертежей и рисунков, это направление развития оптики получило название *геометрическая оптика*. Большую заслугу в ее развитие внесли величайшие физики **Галилей**<sup>65</sup>, **Гюйгенс** и **Ньютон**. Последний, например, экспериментируя с призмой, подробно изучил<sup>66</sup> и описал очень красочное явление: после прохождения призмы узкий белый луч распался на пучок цветных лучей, от фиолетового до красного, как во время радуги. Ньютон правильно понял удлиненную форму спектра, установил со всей определенностью факт различной преломляемости разных цветов спектра в призме, дальнейшую неразлагаемость монохроматического (отдельного) цвета и т.д., что послужило фундаментом нового направления в физике – оптической спектроскопии. Явление разложения белого света в цветовой спектр носит сегодня название *дисперсии* света. Правда, по большей части Ньютон придерживался корпускулярной теории света, полагая свет потоком маленьких световых атомов, а законы преломления и отражения обосновывал разной скоростью распространения частиц света в веществе. Но он знал и о другой теории света, волновой теории, которую развивали **Ф.Гримальди**, **Х.Гюйгенс**, **Р.Гук**, а позднее **Т.Юнг**, **А.Френель** и др.

<sup>65</sup> Итальянец **Галилео Галилей** (1564-1642) более всего известен своими астрономическими наблюдениями и попытками развить учение Коперника, приведшими его даже к смертельной схватке с церковной Инквизицией (Галилея чуть было не сожгли на костре вслед за Дж. Бруно). Но мало кто знает, что первоначально Галилей изучал медицину в Пизанском университете, хотя и оставил позднее медицинский факультет и перевелся на факультет математики и философии.

<sup>66</sup> Первым, видимо, это явление описал, все же, не Ньютон, а чешский физик **Иоханнес Маркус Марци** (1595-1667) в 1648г.

Мы уже упоминали, что опыт повседневной жизни дал людям основание полагать, что свет распространяется в пространстве по прямой линии. Если в лучах света находится непрозрачный предмет, то сзади предмета на экране возникает его тень - место, куда прямолинейный свет не попадет. Однако уже во времена Ньютона оказались замеченными и исключения из этого правила. Итальянец **Ф.Гримальди** заметил, что свет все-таки проникает в область геометрической тени предмета, претерпевая, правда, некоторые изменения. Впоследствии такое таинственное явление было названо *дифракцией* света. Англичанин же **Роберт Гук** (1635-1703) исследовал другое явление, названное впоследствии *интерференцией* света. Он изучал образование цветных колец на поверхности тонких пленок, в частности мыльных пузырей и тонких стеклянных пластин, которые меняли свое место и цвет в зависимости от разных углов падения и наблюдения излучения. Гук, занимавшийся до этого теорией упругости, предположил, что свет «состоит» из быстрых колебаний среды, распространяющихся в разные стороны с очень большой скоростью. В этом случае, если колебания представить гармонической функцией, при наложении разных колебаний друг на друга они будут гасить друг друга, если находятся в противофазе, и усиливать, если находятся в фазе. Позднее голландский астроном **Х.Гюйгенс** развил его идеи, описал явление поляризации света при прохождении света через кристалл исландского шпата и создал математическую волновую теорию света, согласно которой свет распространяется как поток волн в особой всепроникающей среде - эфире. Скорость распространения этих волн экспериментально измерил в 1675 году датский астроном **О.Ремер**. Она получилась у него чуть больше  $3 \cdot 10^8$  м/с. Однако авторитет Ньютона не позволил сразу развиваться волновой теории света, как основной теории. Ньютон, как уже упоминалось, склонялся к корпускулярной теории света и резко критиковал волновую теорию, хотя в его большом сочинении «Оптика» и содержались описания опытов Гука и Гюйгенса, а также излагались различные гипотезы о природе света<sup>67</sup>.

Лишь спустя столетие в работах физиков **Т.Юнга** и **О.Френеля** вновь произошло возрождение волновой теории. На ее основе они математически сумели объяснить явления отражения, интерференции и дифракции света способностью двух наложенных друг на друга волн усиливаться или ослабляться в зависимости от фазы колебаний. Каждому цвету в волновой теории

---

<sup>67</sup> Между Ньютоном и Гуком разгорелась очень острая полемика о природе света. Масло в огонь подливало то, что Ньютон, описывая свои «открытия», практически не упоминал имен Гука и Гюйгенса и их достижения в оптике и механике. Поэтому Гук еще и оспаривал у Ньютона приоритет в открытии ряда явлений, таких, скажем, как интерференционные «кольца Ньютона», или закон тяготения. Ньютон, видимо, чувствовал свою частичную неправоту, поэтому основное сочинение «Оптика» он официально опубликовал, лишь дождавшись смерти Гука. Но на работы Гука так и не дал явных ссылок в своей книге. Как выяснилось позже, не указал Ньютон и в своем основном труде по механике - «Началах» - то, что за 7 лет до выхода книги в свет Гук в письме к Ньютоу уже высказал предположение, что сила притяжения небесных тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между их центрами масс...

была поставлена в соответствие определенная длина волны. Сегодня, зная теорию Максвелла, мы уже не сомневаемся в справедливости описания света, как волнового электромагнитного процесса. Белый свет описывается в рамках волновой теории Максвелла бесконечным рядом Фурье, содержащим самые разные частоты колебаний. Поскольку коэффициент преломления  $n$  является функцией частоты колебаний, разные гармоники преломляются в призме и других материальных средах по-разному, т.к., в том числе, имеют и разную скорость распространения в этих средах. Волновая теория органично соединила свет и тепло источников, представив последнее как излучение инфракрасного (ИК) диапазона длин волн. Цвет же света источника является по современным представлениям психофизическим процессом восприятия и распознавания человеком электромагнитных волн разных частот. Белый свет представляет собой сумму всех цветов, а черный – просто отсутствие света.

Сегодня *оптический диапазон спектра* электромагнитных волн четко разделяется на ряд поддиапазонов, соответствующих разным цветам спектра. Видимым в полном смысле этого слова считается диапазон длин волн, примерно, от 380нм до 780нм (нанометров). Он определяется способностью наших глаз регистрировать это излучение<sup>68</sup>. Ниже этого диапазона лежит ультрафиолетовое излучение, выше – инфракрасное, как изображено на рис.6.7. Оптический диапазон спектра можно более детально, «в цвете», изобразить следующим образом:



**Рис. 6.4.** Оптический диапазон спектра.

Нижней границей оптического спектра считается излучение с длиной волны 1нм (нанометр). Верхняя граница простирается до излучения с длиной волны 1мм (миллиметр). Внутри ультрафиолетового (УФ) диапазона в медицине, особенно в физиотерапии и курортологии, выделяют ряд отдельных поддиапазонов по способности этого излучения оказывать бактерицидное, эритемное и т.п. биологическое действие. Так выделяют диапазоны: **УФ-А** (315-400нм), **УФ-В** (315-280нм) и **УФ-С** (280-100нм).

Одним из вопросов, который может возникнуть в связи с теорией Максвелла применительно к описанию оптических явлений и пониманию действующих физических факторов при проведении процедур физиотерапии, является вопрос, какая же компонента электромагнитного

<sup>68</sup> Разные люди, естественно, имеют разные собственные границы спектральной чувствительности своих глаз. Максимум спектральной чувствительности приходится на зеленый диапазон спектра. В условиях разной освещенности (дневное и ночное зрение) границы спектральной чувствительности глаз сдвигаются, соответственно, немного в красную или синюю области спектра (эффект Пуркинье).

поля,  $\mathbf{E}$  или  $\mathbf{B}$ , оказывает основное физическое действие при взаимодействии света и вещества? В серии тонких экспериментов сначала физиком **Н.Винером**, а затем физиками уже наших дней было показано, что основное действие оказывает вектор  $\mathbf{E}$ . Именно по пути его пучностей, а не вектора  $\mathbf{B}$  ( $\mathbf{H}$ ), возникает, например, почернение фотопластинки, т.е. проявляется *фотохимическое* действие света. Вектор  $\mathbf{E}$  оказался ответственным и за *фотоэлектрический эффект* в веществе, и за *фосфоресценцию, флуоресценцию*<sup>69</sup> и т.п. Это и не удивительно, т.к. все физические процессы подобного рода сводятся к действию поля на элементарные заряды (в первую очередь на свободные электроны и ионы) среды. Такое воздействие на выделенный заряд  $q$  в среде количественно описывается суммой силы Лоренца по (4.4) и электростатической силой Кулона по (2.2). Однако из формулы (5.18) следует, что модуль вектора  $\mathbf{E}$  в  $3 \cdot 10^8$  раз (!) больше модуля вектора  $\mathbf{B}$ . Скорость же зарядов в среде намного меньше скорости света<sup>70</sup>. Поэтому силой Лоренца в данном случае можно просто пренебречь. Она будет в сотни и тысячи раз меньше кулоновских сил, действующих на заряд в поле.

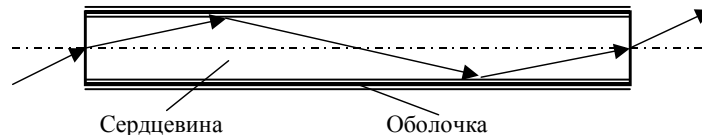
Подобно тому, как электрический ток распространяется по проводам, оптическое излучение, будучи электромагнитной волной, может распространяться направленно по оптическим *диэлектрическим волноводам*. Их часто называют еще *световодами* или *оптическими волокнами*. Устройство оптического световода достаточно примитивно. В нем используется явление полного внутреннего отражения света от границы раздела сред. Само волокно представляет собой тонкий стеклянный, может быть кварцевый или полимерный «волосок», состоящий из сердцевины и оболочки. Соответственно, с ним надо обращаться очень бережно. Световоды очень легко ломаются. Излучение, попадая в волокно с его торца, распространяется вдоль по световоду за счет отражений от границы «серцевина-оболочка» как показано на рис.6.5. Никаких здесь особых премудростей нет. Собранные в жгуты отдельные оптические волокна способны передавать даже полномасштабное цветное изображение, что сегодня повсеместно используется в эндоскопии.

Если Вы обратили внимание, все описанные до сих пор явления касались, в основном, лишь законов распространения света, как электромагнитной волны. Но ничего не было сказано про энергию или мощность излучения. Раздел оптики, который занимается измерениями энергии и мощности света, называется *фотометрия*. В переводе с греческого это буквально означает «измерение света». Основы научных фотометрических представлений о важнейших закономерностях при распространении и взаимодействии света с различными материалами и средами

<sup>69</sup> Флуоресценция и фосфоресценция – две разновидности люминесценции (см. след. раздел).

<sup>70</sup> Не путайте скорость перемещения зарядов в среде, например, электронов и скорость передачи электромагнитных волн в среде. Электроны, создающие электрический ток в проводниках, двигаются по проводникам существенно медленнее скорости света, на несколько порядков. А скорость передвижения ионов в веществе за счет их больших размеров и того меньше (см. таблицу Аррениуса 3.1).

начали формироваться в середине XVIII века трудами таких ученых как **П. Бугер**<sup>71</sup>, **Дж. Ламберт** и **А. Беер**. Сегодня, как ни странно, не смотря на развитие электродинамики и других разделов физики, основы фотометрических представлений практически не претерпели существенных изменений со времен Бугера и Ламберта. Читая книги по фотометрии, можно встретить много устаревших и уже, по существу, не используемых сегодня понятий, поэтому есть смысл остановиться лишь на самых основных величинах и законах фотометрии, которые могут быть полезны клиницисту.



**Рис. 6.5.** Распространение света в оптическом волокне.

С точки зрения физической энергетической модели в классической фотометрии свет рассматривается как поток лучистой энергии, распространяющейся вдоль своей геометрической траектории – прямых геометрических лучей, который подчиняется закону сохранения энергии и направления траектории если по пути своего распространения свет не встречает каких-либо препятствий (других материалов и сред, неоднородностей пространства распространения света и т.п.). Это означает, что энергия света  $E$  (не путайте с напряженностью электрического поля  $E$ ), протекающая в единицу времени через поперечное сечение трубки лучей, остается постоянной. Если рассматривается стационарный (равномерный во времени) процесс, то в каждое мгновенное значение времени  $t$  можно определить некую мгновенную мощность излучения  $W$ , которая в фотометрии носит несколько устаревшее название *светового потока* и измеряется, как и любая мощность в физике, в «ваттах» (Вт):

$$W = \frac{E}{t} . \quad (6.2)$$

Поскольку свет, в общем случае, как мы уже говорили, является «смесью» различных спектральных компонент, при рассмотрении какой-либо одной спектральной частоты света (или длины волны) часто в обиход вводят понятие *спектральной плотности мощности*, т.е. мощности, приходящейся на какую-либо одну выделенную длину волны  $\lambda$  (или, более точно, на

<sup>71</sup> Француз **Пьер Бугер** (1698-1758) считается основоположником фотометрии, хотя часть законов до него была известна еще астроному Иоганну Кеплеру, жившему почти на сто лет раньше. В частности, И.Кеплер вывел закон освещенности тела и доказал, что освещенность падает как квадрат расстояния от тела до источника излучения. Но именно П.Бугер выпустил первый научный труд по фотометрии – знаменитый «Трактат о градации света», ввел основные термины и определения этого раздела физики, сформулировал основные энергетические законы фотометрии и т.д. Ламберт и Беер лишь добавили к этой картине отдельные штрихи и фрагменты.



узкий спектральный диапазон длин волн  $\Delta\lambda$ , т.к. одной идеальной частоты колебаний в природе не существует). В этом случае в обозначении мощности  $W$  добавляют соответствующий индекс -  $W_\lambda$ .

Мощность  $W$ , падающая на какую-либо площадку  $S$ , создает *освещенность* этой площадки, соответствующую пространственной плотности мощности излучения в электродинамике, т.е. модулю вектора Пойтинга:

$$P = \frac{W}{S} \quad (\text{Вт/м}^2). \quad (6.3)$$

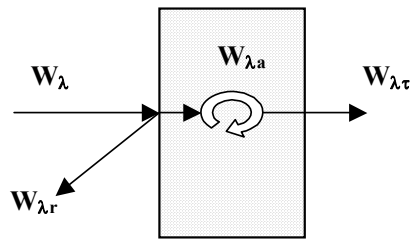
В классической фотометрии, правда, существуют и еще одна система единиц измерения параметров оптического излучения, основанная на энергетической оценке этого излучения глазом человека. Поскольку глаз является спектрально селективным фотоприемником, при сложном спектральном составе излучения его реакция на одну и ту же мощность излучения может быть разной. Поэтому в обращение в фотометрии была введена так называемая система эффективных световых величин и единиц, оценивающая энергетические параметры излучения по их зрительному восприятию. В этой системе единиц за единицу светового потока  $W$  в соответствии с международным соглашением был принят «люмен» (лм). А единицей освещенности по формуле (6.3) является «люкс» (лк). Эффективные световые величины пересчитываются в обычные энергетические величины через спектральную кривую чувствительности глаза. Так, для узкополосного монохроматического излучения с длиной волны 555нм, световой поток в 680лм соответствует мощности излучения в 1 Вт. Но мы далее будем пользоваться только обычными энергетическими величинами, как наиболее часто употребляемыми в практике медицины.

Важной величиной с точки зрения физиотерапии является так называемая *энергетическая экспозиция* – произведение плотности мощности на время действия излучения:

$$H = P \cdot t = \frac{W \cdot t}{S}. \quad (6.4)$$

Экспозиция  $H$  (не путайте с напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$ ) измеряется в «джоулях на квадратный метр (сантиметр)» ( $\text{Дж/м}^2$ ) и очень часто на сленге врачей, особенно «лазерщиков», именуется «дозой» излучения, хотя, если говорить строго, то под дозой излучения в физике (*поглощенной дозой излучения*) принято понимать *энергию излучения*, т.е. «джоули», *приходящуюся на единицу массы (кг) облучаемого вещества* («Дж/кг»), т.к., в конечном счете, именно суммарная поглощенная массой энергия и оказывает основное лечебное действие. Но можно ли возражать против профессионального сленга? Главное, чтобы врачи сами понимали друг друга и то, что они пишут и говорят.

При попадании излучения  $W_\lambda$  на материальную среду часть мощности излучения ( $W_{\lambda r}$ ) сразу будет отражена от поверхности раздела сред согласно закону отражения, часть ( $W_{\lambda a}$ ) пройдет внутрь среды и там поглотится (превратится в тепло, например), а часть ( $W_{\lambda \tau}$ ) пройдет среду насквозь и, если позволяет ее толщина, выйдет с противоположной стороны наружу. Эту картину поясняет рис.6.6.



**Рис. 6.6.** Фотометрическое взаимодействие света с материальной средой.

Согласно закону сохранения энергии можно записать, что:

$$W_\lambda = W_{\lambda r} + W_{\lambda a} + W_{\lambda \tau}. \quad (6.5)$$

Выражение (6.5) называют *основным уравнением фотометрии*. Оно показывает, как расходуется энергия при попадании излучения на материальную среду. Если все части уравнения разделить на  $W_\lambda$ , то получим:

$$1 = r_\lambda + a_\lambda + \tau_\lambda, \quad (6.6)$$

где:  $r_\lambda = W_{\lambda r}/W_\lambda$ ,  $a_\lambda = W_{\lambda a}/W_\lambda$  и  $\tau_\lambda = W_{\lambda \tau}/W_\lambda$  называются, соответственно, спектральными коэффициентами отражения, поглощения и пропускания излучения. В общем случае они являются функцией длины волны излучения (для разных длин волн могут быть различны), поляризации излучения и т.п., но всегда меньше 1.

Согласно волновой теории света и теории электромагнетизма Максвелла коэффициент отражения  $r_\lambda$  определяется комплексным коэффициентом преломления среды  $n^*$  (см. формулу (5.19)) или, что то же самое, ее импедансом (5.20). При падении излучения из среды 1 в среду 2 перпендикулярно границе раздела сред поляризация излучения не имеет значения, и коэффициент отражения  $r$  может быть вычислен по упрощенной формуле Френеля:

$$r_\lambda = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad (6.7)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – импеданс сред 1 и 2 соответственно. Если излучение падает на среду из вакуума (воздуха), то с большой степенью точности можно выразить импеданс среды через относительный комплексный показатель преломления, вернее, через его отдельные части  $n$  и  $\sigma$ . Тогда (6.7) может быть записано в виде:

$$r_{\lambda} = \frac{(n-1)^2 + \sigma^2}{(n+1)^2 + \sigma^2}, \quad (6.8)$$

где, напомним,  $n$  – действительная часть показателя преломления,  $\sigma$  - параметр проводимости среды (проводимости для переменного электрического тока, конечно, причем с данной «оптической» частотой колебаний). Если рассматривать биологические ткани, то типовые значения  $n$  для оптического диапазона длин волн лежат в пределах  $n=1.1-1.5$ . В основном  $n=1.3-1.4$ , что определяется преломлением света водой. В этом случае, если принять проводимость биотканей равной нулю ( $\sigma=0$ ), можно подсчитать, что коэффициент отражения будет лежать в диапазоне 0.017-0.028. Т.е. это порядка 1-2%. Сильно отражать излучение могут согласно формуле Френеля (6.8) только хорошо проводящие ток материалы и среды ( $\sigma \gg 0$ ). Именно поэтому хорошо отражают свет полированные металлы (до 90-95%). Поверхность стекла имеет коэффициент отражения порядка 5-10%. Обратите внимание, что все зеркала в домах представляют собой стекло с напыленным сзади слоем металла. Иначе не будет зеркала! В биологических тканях основными проводниками тока являются растворы электролитов – кровь, например. Но ее проводимость существенно меньше, чем у металлов. Поэтому ожидать больших коэффициентов отражения электромагнитного излучения от биологических тканей не приходится.

Есть, правда, для оптического диапазона спектра одно очень специфическое явление, которое по своим результатам может конкурировать с сильным отражением. Это явление носит название *рассеяния* света. Вообще, при рассмотрении любых вопросов распространения электромагнитных волн в пространстве и веществе очень важным является вопрос соотношения длины волны излучения и некоторых характерных пространственных элементов вещества, внутренних неоднородностей, например. Понятно, что если длина волны большая, скажем порядка 1м, как для УВЧ диапазона, то мелкие препятствия или неоднородности размерами в миллиметры и менее на пути своего распространения такое излучение просто «не заметит». Если, наоборот, длина волны излучения будет маленькой, как у света, а препятствие будет больших размеров (метры), то свет не сможет пройти через такое препятствие иначе, как по схеме рис.6.6. В основном, для непрозрачных сред, по пути расположения препятствия будет наблюдаться область тени. А, вот, если длина волны будет соизмерима с размерами препятствия, можно ожидать каких-либо особых эффектов. В теории волновых процессов к таким эффектам, например, относится дифракция волн – их загибание в область тени и образование сложной интерференционной картины по краям изображения.

Другим примером особых эффектов является рассеяние волн. *Рассеяние света* – это совокупный процесс, состоящий из многократных актов переотражения излучения на множественных границах неоднородностей среды и множественной дифракции отдельных лучей на этих

неоднородностях. В нашем примере оптического излучения и биологических тканей множественными неоднородностями на пути распространения света являются, например, клетки биоткани. Обладая сложной структурой, мембранами, ядрами, по своим размерам соизмеримыми с длиной волны света (микронны и доли микрона), эти неоднородности создают, по сути, случайное поле различных показателей преломления  $n^*$ . Свет, проходя такую структуру, будет разбиваться на сотни и тысячи мелких лучей, распространяющихся случайным образом по случайным направлениям, как показано на рис.6.7.

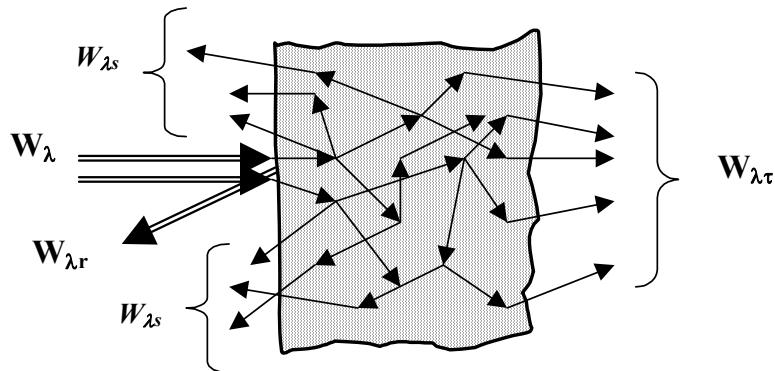


Рис. 6.7. Рассеяние света в среде.

Это приведет к тому, что на передней поверхности биоткани, например, помимо чисто отраженного излучения от границы раздела «биоткань-воздух», появится еще так называемое *обратно рассеянное* излучение  $W_{\lambda s}$ , а прошедшее ткань излучение уже не будет строго направлено по лучу, а будет «размыто» по широкой площади тыльной поверхности биоткани. Размыто будет и обратно рассеянное излучение. Его величина может достигать до 30-40% от падающего потока, поэтому, часто, когда говорят об отражении света от тканей, имеют в виду не отраженное, а как раз обратно рассеянное излучение. Отраженное-то излучение составляет всего 1-2% от падающего! А обратно рассеянное излучение в видимом, например, красном диапазоне спектра легко увидеть даже глазом. Направьте сфокусированный луч He-Ne лазера или небольшой лазерной указки на кожу руки и увидите вокруг маленького пятнышка исходного луча большой, до 1-2 см в диаметре, ореол рассеяния. Это и есть вышедший из кожи обратно рассеянный поток света. Рассеяние очень сильно в биотканях, особенно в крови в оптическом диапазоне. На взгляд цвет здоровой кожи должен быть слегка розоватым, а на просвет кончики пальцев, например, всегда красными. Почему? Красный свет сильно рассеивается эритроцитами крови, несущими гемоглобин – основной пигмент в видимом диапазоне длин волн. Зеленый и синий свет гемоглобин сильно поглощает, а красный рассеивает. Вот мы и видим красный или розовый цвет. Не будь явления рассеяния, мы все были бы прозрачны для света, и можно было бы заглядывать к нам внутрь, не используя оптические волокна бронхоскопов, эндоскопов и т.п....

Рассеиваться, конечно, на неоднородностях среды может не только свет, но и волны любых других частотных диапазонов и любой другой природы, например, звуковые. У них, правда, другие длины волн и им для рассеяния нужны другие по размерам препятствия. Но процедуры УЗИ-диагностики построены именно на явлении отражения и рассеяния ультразвука от препятствий - органов. При УЗИ видны крупные органы, сосуды и тканевые слои. Оптические же приборы, позволяющие заглядывать внутрь тканей за счет их зондирования светом (лазерные томографы) позволяют видеть отдельные клетки или группы клеток.

При учете рассеяния света уравнения (6.5) и (6.6) должны быть дополнены соответствующими слагаемыми. В правой части (6.5) появится дополнительный член  $W_{\lambda s}$ , а в правой части (6.6) дополнительный коэффициент обратного рассеяния  $s$ . Надеемся, что это понятно без лишних записей лишних уравнений. Более точный расчет рассеянного излучения – задача довольно сложная. Здесь нет таких простых формул как при отражении, т.к. процесс фактически носит характер статистически случайного. Поэтому такие задачи – удел физиков-профессионалов. В физике даже есть специальный раздел – теория рассеяния и переноса света в случайно-неоднородных средах, посвященный всем этим вопросам. Но он достаточно сложен для элементарного изложения.

А что же происходит со светом, который не испытывает рассеяния, а просто проходит внутрь среды и движется там далее по направлению своего первоначального распространения как это было изображено на рис. 6.6? Такой свет частично поглощается средой по пути своего распространения, т.к. в любой реальной среде параметр проводимости  $\sigma$  всегда отличен от нуля, даже если и очень мал. Для однородной сплошной среды закон поглощения света в среде был установлен еще Бугером. Он сформулировал его в следующем виде: попавший в вещество поток света по мере своего распространения в среде вдоль координаты « $x$ » ослабляется по закону экспоненты. Т.е. в наших обозначениях закон Бугера можно выразить следующим образом:

$$W_{\lambda}(x) = (W_{\lambda} - W_{\lambda r}) \cdot e^{-k_{\lambda}x}, \quad (6.9)$$

где  $k_{\lambda}$  называется *показателем ослабления* потока (он является функцией длины волны излучения). Согласно (6.9) мощность потока  $W_{\lambda}(x)$  в любой точке среды  $x$  может быть найдена, если известен показатель ослабления  $k_{\lambda}$ . При  $x=1/k_{\lambda}$  поток излучения ослабляется в « $e$ » раз (т.е. примерно в 2.7 раз). Это очень важный параметр. Физики условно, подчеркиваем – *условно*, эту величину  $x$  называют *глубиной проникновения* излучения в среду. Врачи же очень часто ошибочно этот термин воспринимают буквально. На этой глубине, если пренебречь отражением, первоначальный поток, скажем в 10 мВт, станет равным 3.7 мВт. Еще через такое же расстояние этот поток ослабнет до 1.4 мВт и т.д. Но это, все равно, не будет нулевой поток! Так что излучение

проникает существенно глубже «глубины проникновения». Весь вопрос в том, какая его доля? Заметим также, что рассеяние в среде, особенно для света, может существенно увеличивать глубину проникновения света в ткани.

Позже, на основе теории Максвелла, было установлено, что параметр  $k_\lambda$  прямо связан с параметром проводимости среды  $\sigma$  соотношением:

$$k_\lambda = \frac{4\pi\sigma_\lambda}{\lambda} . \quad (6.10)$$

Таким образом, чем выше проводимость среды, тем выше и поглощение света и других электромагнитных волн и наоборот. Идеальные диэлектрики не поглощают свет. Общий коэффициент поглощения излучения в среде (доля поглощенного излучения), если среда имеет толщину  $h$ , можно с учетом выражений (6.5), (6.6) и (6.9) вычислить по формуле:

$$a_\lambda = (1 - r_\lambda)(1 - e^{-k_\lambda h}) . \quad (6.11)$$

Попробуйте вывести эту формулу самостоятельно. Из нее и из (6.10) хорошо видно, что коэффициент поглощения является сложной функцией длины волны излучения. Для гемоглобина, как мы уже говорили, поглощение сильно в синем и зеленом диапазонах спектра. Там параметр  $k_\lambda$  может достигать значений  $20\text{-}30\text{см}^{-1}$  и более. Т.е. на глубину в сантиметр уже точно практически никакого излучения не проникает в кровь в этом диапазоне спектра. Поэтому наличие гемоглобина в растворе можно легко определять, пропуская через раствор зеленый луч света. На этом основаны все методы лабораторной спектрофотометрии. В других диапазонах спектра могут поглощать свет другие вещества – билирубин, холестерин, гематин. Так можно выделять в растворах наличие тех или иных веществ. На этом же основаны и новейшие методы неинвазивной спектрофотометрии, когда живая ткань просвечивается светом разных длин волн и анализируется спектральный состав, например, обратно рассеянного излучения. По тому, какие спектральные компоненты и как поглотились в тканях, можно определять, например, наличие сахара в крови, соотношение фракций гемоглобина и оксигемоглобина, т.е. сатурацию (оксигенацию) периферической крови, и т.д.

Количественный анализ наличия веществ в растворе или тканях проводят на основе *закона Бугера-Беера*. Этот закон, выведенный теоретически Бугером и проверенный экспериментально Беером, говорит о том, что параметр  $k_\lambda$  в законе Бугера может быть для многокомпонентной среды представлен как:

$$k_\lambda = \varepsilon_{\lambda 1}c_1 + \varepsilon_{\lambda 2}c_2 + \dots + \varepsilon_{\lambda i}c_i , \quad (6.12)$$

где  $\varepsilon_{\lambda i}$  – спектральные *коэффициенты экстинкции* каждого  $i$ -го компонента раствора, а  $c_i$  – их молярные концентрации. Проводя измерения на разных длинах волн можно определить в рас-

творе все  $c_i$ . Как видите, лабораторные методы анализа тоже иногда базируются на законах физики, а не только химии или биохимии.

В качестве заключения к данному разделу хотелось бы акцентировать внимание читателя на том факте, что все изложенные здесь законы, явления и действующие физические факторы присущи любым электромагнитным явлениям, а не только свету. Свет – обычная электромагнитная волна. Если инфракрасный свет (излучение), проходя через среду, сильно поглощается в ней, то среда нагревается, т.к. поглощенная энергия в среде переходит, главным образом, в тепло. Но это не значит, что биоткань не нагревается похожим образом излучением зеленого диапазона спектра, красного или, даже, СВЧ. Любое поглощенное излучение в той или иной степени переходит в тепло. СВЧ печи и УВЧ-терапия тому прямое подтверждение. Если мы говорим об интерференции (наложении волн с учетом их фазы) для света, то это означает, что интерферировать могут и любые обычные переменные электрические токи в тканях, а также переменные магнитные поля. Это же касается и рассеяния. Просто свет – очень наглядный (в буквальном смысле этого слова) пример, с помощью которого легко представить себе все другие электромагнитные волновые явления и почувствовать их внутреннюю логику и взаимосвязь.

## Глава 7. Квантовая природа света и квантовые оптические явления

---

Используя издавна свет Солнца, костра, свечи, человек, по праву, называл такие источники света тепловыми. Они излучают электромагнитные волны в широком диапазоне спектра, но очень большая доля их излучения приходится на инфракрасный диапазон. Инфракрасные волны с длиной волны больше 1 мкм очень интенсивно поглощаются водой, поэтому, попав в ткань, инфракрасное излучение хорошо поглощается и нагревает ткани, что мы и чувствуем за счет наших тепловых рецепторов. Однако задача расчета точного спектрального закона распределения излучения от таких тепловых источников света очень долгое время не поддавалась физикам и математикам.

Достаточно быстро был найден общий закон теплового излучения – закон Стефана-Больцмана<sup>72</sup>. Он гласит, что общая мощность электромагнитного излучения, включая оптическое, от нагретого до температуры  $T$  тела может быть вычислена по формуле:

$$W = a \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \cdot S, \quad (7.1)$$

где  $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·°К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура тела в градусах Кельвина,  $S$  – площадь поверхности тела,  $a$  – интегральная степень черноты тела<sup>73</sup>. Например, наше тело, нагретое до температуры примерно<sup>74</sup> 300°К, при  $a \approx 1$  и площади поверхности в 1 м<sup>2</sup> излучает каждую секунду электромагнитную энергию мощностью около 400 Вт.

Вскоре был открыт и закон изменения спектра (цвета) излучения в зависимости от температуры тела – так называемый закон смещения Вина. Согласно закону В.Вина (1864-1928) длина волны, соответствующая максимуму энергии в спектре излучения нагретого тела, в координатах «энергия-длина волны» определяется соотношением:

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{b}{T}, \quad (7.2)$$

где  $b = 2898$  мкм·°К – постоянная Вина. Так, для температуры тела человека в 300°К максимум спектра приходится на 9.66 микрон – середину инфракрасного диапазона. Тепловые лампы накаливания, где источником света служит разогретая током вольфрамовая нить, излучают мак-

<sup>72</sup> Жозеф Стефан (1835-1893) сделал такой вывод на основе анализа экспериментальных работ французских физиков. Через пять лет его 24-летний ученик Людвиг Больцман (1844-1906) вывел этот закон теоретически, за что признан сегодня во всем мире как основоположник статистической физики и термодинамики.

<sup>73</sup> Черное тело будет излучать больше энергии, нежели белое, т.к. чем больше коэффициент поглощения излучения телом, тем больше и его «излучательная» способность. При термодинамическом равновесии степень черноты тела равна его коэффициенту поглощения – закон Кирхгофа.

<sup>74</sup> Градусы Цельсия переводятся в градусы Кельвина добавлением величины 273.15° К.



симум энергии в диапазоне около 1 мкм, которая сильно поглощается водой. Поэтому мы чувствуем от них тепло. Но мы видим от них и видимый спектр, т.е. значительная часть излучения ламп приходится и на видимый диапазон длин волн. Их видимый свет кажется нам слегка желтоватым, т.к. у них мало в спектре синего и зеленого излучения, а больше красного и ИК. Излучение же Солнца имеет максимум в области 0.5 мкм – это зеленый диапазон спектра<sup>75</sup>. Солнце – очень сильно нагретый источник. Его поверхностная температура, как «абсолютно черного» тела оценивается примерно в  $\sim 5700^\circ\text{K}$ . А поверхностная плотность мощности, согласно (7.1), – примерно в  $6 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ . В спектре излучения Солнца содержится много жесткого ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения, поэтому излучение Солнца достаточно опасно для живых систем. Нас на Земле от этих частот спасает атмосфера планеты, которая практически не пропускает ультрафиолетовые волны. Из космоса и в южных широтах в полдень Солнце кажется ярко белым (вспомните «Белое Солнце пустыни»). Но в наших широтах оно, как и лампочки накаливания, выглядит желтоватым. Это происходит потому, что атмосфера Земли сильно рассеивает синий свет. Именно поэтому небо нам кажется синим в ясную погоду. Рассеиваясь в атмосфере, синие излучение мало доходит до поверхности Земли, и мы видим спектр Солнца смещенным в желто-красную область, как у электрических лампочек. Особенно красным Солнце можно видеть иногда на закате, на фоне высокой влажности в атмосфере. Пары воды в воздухе еще сильнее рассеивают синий и зеленый свет, поэтому одной из народных примет предстоящей дождливой погоды является ярко красный закат<sup>76</sup>. Но все это лишь качественная картина процесса.

Количественно же и точно описать спектральное распределение мощности излучения в спектре нагретого тела удалось только **Максу Планку** (1858-1947) в 1900г. Для этого ему пришлось оставить все каноны классической физики и привнести в физику нечто совершенно новое, революционное – предположить, что энергия отдельного излучателя (молекулы, атома и т.п.) внутри нагретого тела испускается не непрерывно, а в виде отдельных маленьких порций энергии, равных:

$$E_u = h \nu, \quad (7.3)$$

---

<sup>75</sup> Все сказанное здесь строго относится только к системе координат «энергия-длина волны». В системе координат «энергия-частота колебаний» максимум энергии излучения будет смещен в инфракрасную область. В нашем примере, тогда, максимум излучения Солнца будет лежать в районе 1 мкм – это один из известных парадоксов современной теории теплового излучения.

<sup>76</sup> Вероятность наступления дождливой погоды в зависимости от цвета Солнца при закате, естественно, зависит и от того, в каком направлении вечером дует ветер – на Запад, или на Восток, т.е. от того, куда следуют влажные слои атмосферы – на наблюдателя или от него.

где:  $\nu$  - частота излучения (Гц);  $h=6.625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с («Джоуль-секунда») – фундаментальная *постоянная Планка*. Это позволило получить общую формулу для спектральной поверхностной плотности мощности излучения нагретого «абсолютно черного» тела ( $a=1$ ) в виде:

$$P_{\lambda} = \frac{b_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{b_2/\lambda T} - 1}, \quad (7.4)$$

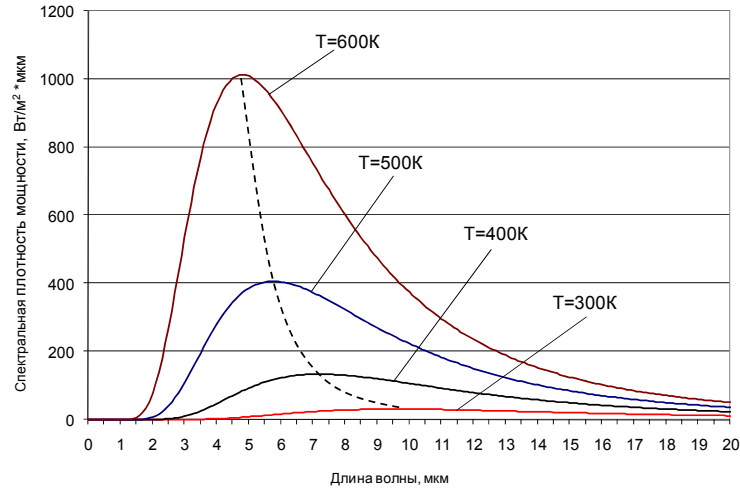
где:  $P_{\lambda}$  - поверхностная (с единицы поверхности) спектральная плотность мощности излучения ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{мкм}$ ),  $b_1=3.74 \cdot 10^{-16}$   $\text{Вт} \cdot \text{м}^2$  – первая радиационная постоянная;  $b_2=1.439 \cdot 10^{-2}$   $\text{м} \cdot \text{°К}$  – вторая радиационная постоянная,  $T$  – температура тела.

Что же привело Планка к такому выводу? Надо сказать, что в то время в физике назрел серьезный кризис, приведший, в том числе, и к появлению теории относительности Эйнштейна. Очень многие вопросы физики оказались буквально «загнанными в тупик». Из классических представлений не только вопрос о спектре излучения нагретого тела не мог получить ответ, но и ряд других важных вопросов. В частности, после триумфального развития теории Максвелла и открытия структуры атома Резерфордом оказался абсолютно непонятным следующий факт. Если электроны постоянно вращаются вокруг ядра атома, то они все время двигаются с центростремительным ускорением<sup>77</sup>. Не вращаться электроны не могут, т.к. тогда, повинаясь закону Кулона, они сразу упали бы на ядро, которое заряжено положительно. Однако, согласно теории Максвелла, любые заряды, двигающиеся с ускорением, должны излучать электромагнитную энергию. Т.е. электроны в атоме, согласно Максвеллу, должны постоянно излучать и терять энергию. Откуда же они ее берут для постоянного излучения?

Изучая эти вопросы, Планк предположил, что излучение энергии происходит все время, но только дискретно, в моменты перехода электрона с одной орбиты на другую. Каждая орбита характеризуется своей энергией, и разность энергий орбит и составляет энергию излучения электрона по формуле (7.3). Поскольку тепловое излучение нагретых тел, особенно не сильно нагретых, вызывается не столько за счет электронных переходов, сколько за счет колебательных и вращательных энергий атомов и молекул, Планку пришлось предположить, что и эти энергетические состояния (уровни) молекул и атомов *квантованы*. Средняя энергия теплового движения частицы определяется формулой (1.7). Но переход из одного конкретного энергетического состояния в другое происходит не непрерывно, а скачками, порциями. Общее же излучение нагретого тела определяется статистикой состояния всех его отдельных элементарных внутренних излучателей. Так ему удалось угадать вид формулы (7.4).

<sup>77</sup> Любое вращательное движение тела сопровождается его центростремительным (осецистремительным) ускорением. Это следует из того факта, что при вращении тела в каждое мгновение времени на тело должна действовать какая-либо сила, направленная к центру вращения (центростремительная сила), заставляющая тело поворачивать. Модуль этой силы, деленный на массу тела, и даст значение центростремительного ускорения.

На рис. 7.1 в качестве примера представлены рассчитанные по формуле Планка спектральные распределения плотности мощности излучения «абсолютно черных» тел при разных температурах. Хорошо видно, как смещается влево максимум спектра излучения при увеличении температуры тела, подчиняясь закону смещения Вина.



**Рис. 7.1.** Спектр излучения нагретых тел при разной температуре.

Для целей физиотерапии можно запомнить, что в шкале длин волн температуры тела в 500-600<sup>0</sup>K приводят, в основном, к инфракрасному излучению тел. Нагретое свыше 1000<sup>0</sup>K тело будет уже сильно излучать и в видимом диапазоне спектра. А свыше 3000<sup>0</sup>K – в ультрафиолетовом. Однако в медицине для получения ультрафиолетового излучения часто пользуются не только тепловыми источниками света, и не столько ими, сколько специальными газоразрядными лампами, например, ртутными. Излучение в них создается за счет электрического разряда в парах металлов, поэтому спектральное распределение плотности мощности излучения в таких лампах не подчиняется закону Планка.

Идея Планка о квантовании энергии излучения в более развитой форме была применена Эйнштейном для описания фотоэффекта – явления выбивания электронов в веществе под действием квантов света<sup>78</sup>. Эйнштейн предположил, что излучение не только испускается квантами, но и вообще существует и распространяется в пространстве в виде квантов. Далее Эйнштейн обосновал возможность дискретной передачи энергии атомам и электронам в атомах вещества, путем их «квантовой накачки» - т.е. путем добавления к системе частиц порций энергии, достаточной для того, чтобы, в отличие от ситуации излучения, электроны и атомы пере-

<sup>78</sup> Именно за фотоэффект и обоснование возможности создания вынужденного квантового излучения в среде, т.е. фактически за фундаментальные основы квантовой электроники и лазерной техники, а не за теорию относительности Эйнштейну была присуждена докторская степень и Нобелевская премия. Докторская диссертация Эйнштейна, подготовленная им в 1905г. по специальной теории относительности, была признана на заседании Диссертационного совета Цюрихского университета посредственной (!) и, соответственно, отклонена.

ходили не с более высоких энергетических орбит на более низкие, а наоборот. Это открыло путь к изобретению лазеров.

Изобретение лазеров относится к концу 1950-х – началу 1960-х гг. и связано с именами трех русских и двух американских ученых: **В.Фабриканта**, **А.Прохорова**, **Н.Басова**, **Ч.Таунса** и **Т.Меймана**<sup>79</sup>. Внутри лазера протекают чисто квантовые процессы вынужденного (за счет внешней энергии «накачки») возбуждения атомов среды и последующего синхронного их перехода в более низкоуровневое энергетическое состояние с переизлучением запасенной в них энергии в оптическом диапазоне длин волн. Такое излучение, можно сказать, синхронизировано по времени и энергии, поэтому излучение лазера сильно отличается по своим свойствам от излучения просто нагретых (тепловых) источников света. Излучение лазера обладает, во-первых, очень большой степенью монохроматичности. Для практических медицинских приложений можно условно считать, что излучение лазера происходит просто на какой-то одной длине волны. Для He-Ne лазера, например, одной из таких длин волн является красный свет с  $\lambda=632\text{нм}$ . Во-вторых, излучение лазера обладает большой степенью когерентности – все волны от каждого элементарного излучателя в среде лазера синхронизированы по частоте  $\omega$  и фазе  $\varphi$  (см. формулу 1.12). И, в-третьих, оно, как правило, в очень большой степени поляризовано.

Поскольку энергия квантов оптического излучения соизмерима с энергиями отдельных атомов вещества и энергиями электронов в атомах, взаимодействие оптического излучения с материальными средами, помимо рассмотренных уже выше процессов взаимодействия с веществом оптического излучения как электромагнитной волны, имеет и другие специфические особенности. Если рассматривать один отдельный квант света, он может поглощаться в среде, переводя атом или молекулу вещества на другой энергетический уровень, а электроны в атоме на другие энергетические орбиты. Возвращаясь, спустя некоторое время обратно, на прежний энергетический уровень, атомы вещества могут передавать высвободившуюся порцию энергии другим соседним атомам за счет столкновений. Так происходит переход энергии излучения в тепло (тепловая релаксация атомов и молекул). Высвободившаяся энергия может пойти и на ускорение каких-либо биохимических реакций в сложных многокомпонентных веществах, таких как биологические жидкости (кровь, лимфа, цитоплазма клеток и т.п.) и ткани. Обратный переход электронов на более низкие энергетические орбиты может сопровождаться вторичным переизлучением кванта света (явление люминесценции), образованием новых химических связей в молекулах и, опять же, переходом излучения в тепло. Кроме того, квант света, попав в ка-

---

<sup>79</sup> Басов, Прохоров и Таунс в 1964г. были удостоены за это Нобелевской премии. Н.Басов, возглавивший затем физический институт РАН, имея второе среднее медицинское образование, очень быстро увидел перспективу применения лазеров в медицине и инициировал серию первых фундаментальных НИР по этому направлению совместно с Министерством здравоохранения СССР.

кую-либо молекулу, может и разрушить ее, если энергия кванта света будет соизмерима с энергией связи атомов в молекуле. В большей степени это относится к квантам ультрафиолетового, рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, т.к. эти кванты обладают очень большой энергией на уровне микромира. Поэтому и говорят о фотодеструкции и фотодиссоциации молекул под действием света. Поэтому и губительно для многих сложных органических жидкостей, микроорганизмов и клеток действие такого излучения. Но ошибочно думать, что фотодеструкция может происходить только в УФ-лучах. Энергия кванта света красного диапазона спектра (He-Ne лазер) соизмерима с энергией двойной связи атомов углерода и азота (C=N) в белках и других макромолекулах. Энергия кванта света зеленого диапазона спектра соизмерима с одинарной связью углерод-углерод (C-C) и т.д. Попадая в молекулы, содержащие такие связи, свет может приводить к их быстрой фотодеструкции. Т.е. здесь может наблюдаться целый спектр квантовых явлений, которые изучают уже такие науки как фотофизика, фотохимия, фотобиология и т.п. Пример фотосинтеза – один из ярких примеров квантовых оптических явлений в биологии.

Интересно поэтому оценить, сколько квантов света может содержаться в излучении лазера типовой «медицинской» мощности. Возьмем, опять же, He-Ne лазер. Квант света с  $\lambda=632\text{нм}$  ( $\nu=4.75\cdot 10^{14}$  Гц) обладает энергией порядка  $3.14\cdot 10^{-19}$  Дж. Если лазер имеет мощность 1 мВт и излучает ее в течение 1 секунды, то его энергия излучения составит  $10^{-3}$  Дж. Значит, в течение этой секунды лазер должно покинуть примерно  $3\cdot 10^{15}$  квантов света. Даже если вероятность попадания одного кванта света в одну отдельную молекулу биоткани и не очень высока, скажем менее 0.001% ( $10^{-5}$ ), то все равно таких попаданий может произойти до  $10^{10}$  степени за каждую секунду работы лазера! Именно столько различных фото процессов на уровне отдельных молекул и атомов может происходить внутри биоткани при проведении терапевтической лазерной процедуры.

Энергия квантов излучения других спектральных диапазонов электромагнитных волн существенно меньше энергии оптических квантов, а длины их волн существенно больше, поэтому они не могут взаимодействовать с веществом эффективно на квантовом уровне – уровне отдельных молекул или атомов. Например, для сравнения можно взять диапазон СВЧ излучения, скажем с  $\nu=4.75\cdot 10^9$  Гц ( $\lambda=6.32$  см). Тогда по формуле (7.3) энергия СВЧ-кванта будет ровно на 5 порядков меньше энергии кванта He-Ne лазера, т.е. примерно равна  $3.14\cdot 10^{-24}$  Дж. Чтобы сравнить их потенциально возможное квантовое действие рассмотрим, например, эквивалентную кинетическую температуру взаимодействия такого кванта с веществом. Для этого, приравняем энергию одного кванта к средней тепловой энергии движения частицы по формуле (1.7):

$$h\nu = \frac{1}{2}kT$$

и выразим отсюда «температуру» кванта:

$$T = \frac{2h\nu}{k},$$

где  $k$ , напомним, - постоянная Больцмана. Выполнив численные расчеты, получим, что для СВЧ-кванта эффективная температура взаимодействия будет равна  $0.45^\circ \text{K}$ . Это очень маленькая величина, существенно ниже комнатной температуры, что говорит о том, что обычные электромагнитные тепловые процессы в среде будут полностью доминировать над квантовыми эффектами в СВЧ диапазоне длин волн. Да и длина волны СВЧ-кванта, т.е. пространственная область, где локализована его энергия, намного больше характерных размеров молекул и клеток тканей. Т.е. взаимодействие в СВЧ диапазоне с биологическими тканями практически полностью подчиняется законам теории электромагнетизма для сплошной однородной среды. Для кванта же света He-Ne лазера эффективная температура взаимодействия окажется на 5 порядков выше, чем у кванта СВЧ, т.е. около  $45000^\circ \text{K}$ ! А это уже, как все понимают, очень высокая температура, способная передавать молекулам, атомам и электронам вещества на квантовом уровне очень большую энергию. Эта энергия компактно локализована в пределах одного микрона, что соизмеримо с размерами клеток тканей и больших макромолекул, следовательно, здесь могут проявляться яркие квантовые эффекты, включая эффекты фотодиссоциации и фотосинтеза различных органических молекул. Не случайно наш организм в ходе эволюции выработал защитную реакцию на появление излишней внешней освещенности тела светом в виде появления загара.

Говоря о квантовых источниках излучения, используемых в современной физиотерапии, надо, видимо, несколько слов в заключение сказать и об обычных светодиодах. Светодиод – это полупроводниковый квантовый излучатель, работа которого основана на процессах вынужденной *электролюминесценции*. Процессы электролюминесценции в полупроводниковых материалах были открыты русским экспериментатором **О.Лосевым** в 1923г. и получили название "*свечение Лосева*". Суть свечения также Лосева заключается в высвечивании квантов света электронами, теряющим свою энергию при переходе на более низкоуровневую орбиту, когда предварительно они были возбуждены энергией электрического тока, протекающего через полупроводник. Свет светодиодов занимает, можно сказать, по своим спектральным характеристикам промежуточное положение между тепловыми источниками света и лазерами. Если у тепловых источников очень широкий спектр излучения, как показано на рис. 7.1, а у лазеров, наоборот, очень узкий, почти монохроматический, то у светодиодов спектр излучения существенно шире лазерного, но много уже теплового. Типовая полуширина спектра излучения светодиодов – 10-20нм, т.е. красный светодиод с центральной длиной волны 630нм на самом деле имеет спектр где-то от 620 до 640-650 нм. Однако энергия кванта света при этом меняется в очень и очень

незначительных пределах. Так что с точки зрения квантовой физики, равно как и с точки зрения электродинамики, свет светодиода, лазера и теплового источника излучения одной и той же длины волны ничем не отличается один от другого, если, пожалуй, только не принимать во внимание степень поляризации излучения, влияние которой на живые системы пока еще изучено очень слабо, хотя и стали уже появляться первые приборы для физиотерапии, использующие поляризованный свет.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1. Скалярные и векторные величины

В физике и математике различают скалярные и векторные величины. Величины называются скалярными, если после выбора соответствующих единиц измерения они характеризуются одним единственным числом. Примерами скалярных величин являются плотность, масса, объем, температура, заряд. Эти величины могут быть распределены в пространстве так, что каждой пространственной координате будет соответствовать своя конкретная скалярная величина. Тогда говорят о поле скалярных величин. Примером скалярного пространственного поля может являться поле распределения температуры воздуха в комнате.

Векторные величины характеризуются двумя разными смысловыми параметрами: геометрическим (пространственным) направлением и модулем – алгебраическим числом, определяющим «размер» (длину) вектора. Понятие вектора, поскольку он характеризуется направлением в пространстве, неразрывно связано с какой-либо выбранной системой координат. В подавляющем большинстве случаев рассматривают прямоугольную декартову систему координат. В ней вектор на чертеже изображается стрелкой, имеющей длину и направление. Если для примера взять задачу в пространстве двух измерений (на плоскости), то произвольный вектор  $\mathbf{OA}$  может быть изображен, как показано на рис. 1.

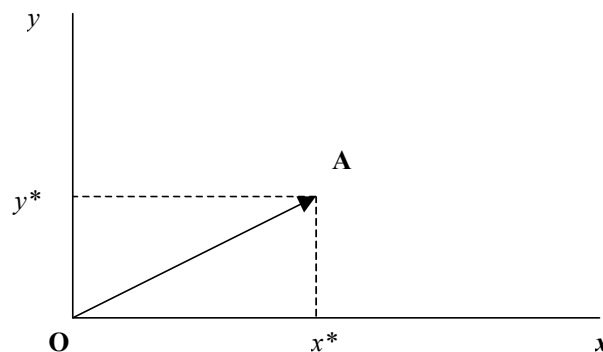


Рис. 1. Изображение вектора в прямоугольной системе координат на плоскости.

Конец вектора  $\mathbf{OA}$  со стрелочкой имеет скалярные координаты в выбранной системе координат  $(x^*, y^*)$ . Какова длина этого вектора? Очевидно, что по теореме Пифагора модуль (или длина, что то же самое) вектора может быть вычислена как:

$$|\mathbf{OA}| = \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2}. \quad (\text{П1.1})$$



Для обозначения векторов в текстах книг и статей обычно используют символы, выделенные жирным шрифтом. Те же символы, но напечатанные обычным шрифтом, как правило, служат для обозначения модулей этих векторов.

Вектора, кроме графического изображения в системе координат, могут быть также заданы аналитически (в виде формулы, выражения) если ввести понятие *единичного вектора*. Единичный вектор направлен точно по какой-либо оси системы координат и имеет модуль, равный 1. Он, фактически, задает единицу длины, масштаб по этому направлению. Пусть, скажем, в нашем примере мы определим два единичных вектора –  $\mathbf{x}_0$  и  $\mathbf{y}_0$ , направленных по соответствующим осям координат  $x$  и  $y$ :

$$|\mathbf{x}_0|=1 ; |\mathbf{y}_0|=1 .$$

Тогда аналитическое математическое выражение для нашего вектора  $\mathbf{OA}$  будет в физике и математике выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{OA}=x \cdot \mathbf{x}_0+y \cdot \mathbf{y}_0$$

Здесь операция сложения понимается *условно*. Никакого сложения реально делать не нужно. Просто это такая удобная форма записи разложения вектора по его пространственным координатам. Естественно, если рассматривается трехмерное пространство с добавочной координатой  $z$ , то во все приведенные выше формулы следует добавить соответствующее слагаемое с  $z_0$ . В общем виде любой произвольный вектор  $\mathbf{a}$  может быть записан в трехмерном декартовом пространстве как:

$$\mathbf{a}=a_1\mathbf{x}_0+a_2\mathbf{y}_0+a_3\mathbf{z}_0 , \quad (\text{П1.2})$$

а его модуль будет определяться выражением:

$$|\mathbf{a}| = a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} . \quad (\text{П1.3})$$

Числа  $a_i$  часто называют составляющими вектора  $\mathbf{a}$  или его проекциями на оси координат. Они, естественно, уже являются обычными скалярными величинами, и все операции с ними производятся по обычным законам алгебры.

С векторами, как и с другими математическими величинами, можно также производить разные математические операции: складывать, вычитать, умножать на константу, умножать друг на друга и т.п. Правда, поскольку векторы имеют кроме длины еще и направление, часть этих операций весьма специфична.

Наиболее просто вектор умножается на любую скалярную величину. Умножение вектора  $\mathbf{a}$  на скалярную константу  $k$  выполняется по правилу:

$$\mathbf{a} \cdot k = k \cdot \mathbf{a} = k(a_1\mathbf{x}_0+a_2\mathbf{y}_0+a_3\mathbf{z}_0) = ka_1\mathbf{x}_0+ka_2\mathbf{y}_0+ka_3\mathbf{z}_0 \quad (\text{П1.4})$$

С точки зрения векторной алгебры умножение вектора на константу  $k$  фактически масштабирует каждую проекцию вектора в  $k$  раз. Модуль вектора при этом также увеличится в  $k$  раз (проверьте это самостоятельно подстановкой результата (П1.4) в (П1.3)).

Сложение двух векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  производится более сложным образом:

$$\mathbf{a}+\mathbf{b}=(a_1+b_1)\mathbf{x}_0+(a_2+b_2)\mathbf{y}_0+(a_3+b_3)\mathbf{z}_0 .$$

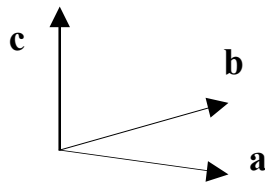
В результате сложения получается новый вектор, направленный по правилу «параллелограмма», как показано на рис. 2 для результирующей силы. Его проекции будут представлять суммы соответствующих проекций складываемых векторов. Модуль суммарного вектора определяется обычным образом по формуле (П1.3). Сложить вектор с обычным скалярным числом нельзя, т.к. это разные понятия. Складывать вектора можно только друг с другом. Взаимный порядок слагаемых, естественно, не имеет никакого значения (от перемены мест слагаемых сумма векторов не меняется).

Вычитание векторов, как и в обычной алгебре, – то же самое сложение, но со знаком минус. В нашем примере при вычитании векторов  $\mathbf{a}-\mathbf{b}$  все знаки «+» в скобках для проекций разностного вектора были бы заменены на знаки «-».

Умножение вектора на вектор наиболее сложно и необычно. При умножении разделяют *скалярное* и *векторное* перемножение векторов. При скалярном произведении векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  получается в результате простое скалярное число  $c$ . Скалярное произведение обозначается обычной «точкой», но иногда запись выполняют и без нее:

$$\mathbf{a}\cdot\mathbf{b}=\mathbf{ab}=c=a_1b_1+a_2b_2+a_3b_3$$

Здесь уже, поскольку в записи в правой части нет единичных векторов, подразумевается обычное сложение скалярных произведений проекций векторов, т.е. результат – одно обычное число. Векторное же произведение в результате дает вектор. Его направление будет перпендикулярно плоскости, в которой лежат перемножаемые вектора, как показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Векторное перемножение векторов.

Составляющие вектора  $\mathbf{c}$  определяются по формулам (с учетом знака):

$$c_1=a_2b_3-a_3b_2 ; c_2=a_3b_1-a_1b_3 ; c_3=a_1b_2-a_2b_1 .$$

Получаемый знак (+ или -) у каждой составляющей нового вектора будет определять его направление в выбранной системе координат. Общая запись векторного произведения в математике выглядит следующим образом:

$$\mathbf{c}=[\mathbf{a}\times\mathbf{b}] \text{ или } \mathbf{c}=[\mathbf{ab}] .$$

Здесь важен порядок записи сомножителей, т.к. его изменение ведет к изменению направления вектора  $\mathbf{c}$ .

Теперь должны быть понятны все операции с векторами, особенно в разделах электричества и магнетизма, где часто перемножаются вектора напряженностей поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ .

## Приложение 2. Международная система единиц измерения физических величин (СИ).

До 1963г. в нашей стране и во всем мире были приняты три разные метрические системы единиц: абсолютная физическая система (СГС), абсолютная практическая система (МКС) и техническая система (МКГСС). Это было очень неудобно, и даже опытные физики часто путались в разных единицах разных размерных физических величин. С 1963г. во всем мире согласно рекомендациям XI Генеральной конференции по мерам и весам (1960г.) в качестве предпочтительной введена Международная система единиц СИ (SI), которая образует единую систему единиц для всех стран и всех областей знаний. Эта система единиц теперь и должна использоваться во всех научных статьях и книгах в качестве основной, если не оговорено иное. Система СИ содержит в себе основные единицы СИ, дополнительные единицы СИ и производные единицы, имеющие собственные наименования. Эти величины представлены в таблицах П2.1-П2.3.

Таблица П2.1.

### Основные единицы СИ

Величина	Наименование (размерность)	Обозначение русское	Обозначение международное
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с (сек)	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Температура	кельвин	К (°K)	K (°K)
Сила света	канделла	кд	cd
Количество вещества	моль	моль	mol

Таблица П2.2.

### Дополнительные единицы СИ

Величина	Наименование (размерность)	Обозначение русское	Обозначение международное
Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср (срад)	sr

**Производные единицы СИ,  
имеющие собственные наименования**

Величина	Наименование (размерность)	Обозначение русское	Выражение через другие единицы СИ
Частота	герц	Гц	$c^{-1}$ *)
Сила	ньютон	Н	$м \cdot кг / c^2$
Давление	паскаль	Па	$Н / м^2$
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж	Н·м
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	Дж/с
Электрический заряд	кулон	Кл	А·с
Электрический потенциал, напряжение, э.д.с.	вольт	В	Вт/А
Электрическая емкость	фарада	Ф	Кл/В
Электрическое сопротивление	ом	Ом	В/А
Электрическая проводимость	сименс	См	А/В
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	В·с
Магнитная индукция	тесла	Т (Тл)	$Вб / м^2$
Индуктивность	генри	Г (Гн)	Вб/А
Световой поток	люмен	лм	кд·ср
Освещенность	люкс	лк	$кд \cdot ср / м^2$

\*) **Примечание:** напомним, что запись любого числа в отрицательной степени означает дробь этого числа с положительной степенью числа в знаменателе дроби, например:  $c^{-1} = 1/c$  ;  $м^{-2} = 1/м^2$  и т.д.

Часто указанные в таблицах системы СИ величины являются очень маленькими, или, наоборот, очень большими для выражения тех физических величин, с которыми приходится иметь дело на практике. В физиотерапии, например, токи в 1А (один ампер) являются очень большими и опасными для жизни пациента. В этих случаях в системе СИ удобно предусмотрено использование стандартизованных десятичных кратных и дольных единиц измерения. Для величин веса, расстояний и т.п. кратные и дольные единицы и их наименования хорошо известны любому человеку (метр-километр; метр-миллиметр; грамм-килограмм и т.д.). Этот принцип распространяется на любые единицы измерений и поясняется в таблице П2.4. Согласно этому принципу все величины можно «дробить» или «умножать» на степень числа, кратную 10. Каждая получаемая в результате такой операции «дольная» или «кратная» единицы имеют свои на-

звания, образуемые добавлением соответствующей смысловой приставки к обозначению основной единицы измерения той или иной физической величины. Так, 1 километр равен 1000 метров, т.е.:  $1\text{км}=1000\text{м}=1\cdot 10^3\text{м}=10^3\text{м}$ . К слову «метр» добавляется кратная приставка «кило», обозначающая множитель  $10^3$ .

Если измеряемая величина, наоборот, меньше основной единицы измерения, степень числа будет отрицательной. Маленький ток, например, в  $0.000005\text{А}$  можно представить как ток в «микроамперах»:  $0.000005\text{А}=5\cdot 10^{-6}\text{А}=5\text{мкА}$ . Здесь использована уже дольная приставка «микро», обозначающая множитель  $10^{-6}$ . И т.д.

Таблица П2.4.

**Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц и их наименования**

Множитель	Приставка		
	наименование	обозначение	
		русское	международное
$10^{12}$	тера	Т	T
$10^9$	гига	Г	G
$10^6$	мега	М	M
$10^3$	кило	к	k
$10^2$	(гекто)*	г	h
$10^1$	(дека)	да	da
$10^{-1}$	(деци)	д	d
$10^{-2}$	(санتي)	с	c
$10^{-3}$	милли	м	m
$10^{-6}$	микро	мк	$\mu$
$10^{-9}$	нано	н	n
$10^{-12}$	пико	п	p
$10^{-15}$	фемто	ф	f
$10^{-18}$	атто	а	a

\*) В скобках указаны наименования приставок, которые допускается использовать лишь для широко распространенных кратных и дольных единиц (сантиметр, гектар, декалитр и др.).

Иногда, правда, в отдельных разделах естествознания сохраняются еще для ряда физических величин и внесистемные единицы измерения или единицы измерения, заимствованные из других систем. Часто это происходит по причине профессионального сленга, часто некоторыми другими единицами измерения просто пользоваться привычнее и удобнее. В большей степени это относится к единицам измерения давления и температуры (особенно в медицине), а также энергии и теплоты.

Давление по традиции измеряют в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.) в медицине и в атмосферах в физике и технике (физическая и техническая атмосфера). Ниже приведены переводные коэффициенты для этих единиц измерения:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133.322 \text{ Па (Н/м}^2\text{)}$$

$$1 \text{ атмосфера техническая (1 атт=1кГ/см}^2\text{)} = 9.80665 \cdot 10^4 \text{ Па (Н/м}^2\text{)}$$

$$1 \text{ атмосфера физическая (1 атм)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1.01325 \cdot 10^5 \text{ Па (Н/м}^2\text{)}$$

Температура в быту и медицине чаще измеряется в градусах по шкале Цельсия, нежели чем в градусах по шкале Кельвина.  $1^\circ\text{C} = 1^\circ\text{K} + 273.15^\circ\text{K}$ .

Единицей измерения количества теплоты может служить *калория*. Поскольку, фактически, количество теплоты является энергией, калория (международная) переводится в единицы измерения энергии (джоули) следующим образом:

$$1 \text{ кал} = 4.1868 \text{ Дж.}$$

Если речь заходит об очень маленьких уровнях энергии, соизмеримых с уровнями отдельных квантов света или энергиями связей атомов в молекуле, в качестве единиц измерения энергии часто выступает внесистемная единица энергии «электрон-вольт» (*эВ*):

$$1 \text{ эВ} = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Это энергия, приобретаемая одним электроном в электростатическом поле  $E=1 \text{ В/м}$ .

Энергия кванта красного света от He-Ne лазера будет тогда в этой размерности равна порядка  $2 \text{ эВ}$ , что намного легче запомнить, чем какое-то число в минус 19-ой степени.

Более подробную информацию о переводе различных величин из одной системы единиц в другую можно найти в любом справочнике по физике.

### Приложение 3. Некоторые основные физические (мировые) константы

---

Заряд электрона  $e=1.6022 \cdot 10^{-19}$  Кл

Масса покоя электрона  $m_e=9.1096 \cdot 10^{-31}$  кг

Масса покоя протона  $m_p=1.6726 \cdot 10^{-27}$  кг

Постоянная Больцмана  $k=1.3806 \cdot 10^{-23}$  Дж·(°К)<sup>-1</sup>

Постоянная Вина  $b=2.8978 \cdot 10^{-3}$  м·°К

Постоянная гравитационная  $G=6.6732 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>·кг<sup>-2</sup>

Постоянная магнитная  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

Постоянная Планка  $h=6.6262 \cdot 10^{-34}$  Дж·с

Постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma=5.6696 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·(°К)<sup>-4</sup>

Постоянная электрическая  $\varepsilon_0=8.841910^{-12}$  Ф/м

Радиус электрона классический  $r_e=2.8179 \cdot 10^{-15}$  м

Скорость света в вакууме  $c=2.9979 \cdot 10^8$  м/с

Ускорение свободного падения стандартное  $g=9.8067$  м·с<sup>-2</sup>

Число Авогадро  $N_A=6.0222$  моль<sup>-1</sup>



## Рекомендуемая литература

1. Боголюбов В.М., Пономаренко Г.Н. Общая физиотерапия: Учебник. – 3-е изд., перераб. – М., СПб, СЛП, 1998. – 480с.
2. Григорьев В.И., Мякишев Г.Я. Силы в природе. Изд. 4-е. – М.: Наука, 1973. – 403.
3. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. Изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 1995. – 463с.
4. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. / 2-е изд. – М.: Просвещение, 1982. – 448с.
5. Купер Л. Физика для всех. В 2-х томах. – М.: Мир, 1973.
6. Москвин С.В. Лазерная терапия, как современный этап развития гелиотерапии (исторический аспект) // Лазерная медицина, Т.1, вып.1, 1997. – с.44-49.
7. Петренко Ю. Нужна ли физика врачу? // Наука и жизнь, №5, 2003. – с.32-35.
8. Роджерс Э. Физика для любознательных. В 3-х томах. – М.: Мир, 1973.
9. Спасский Б.И. История физики. В 2-х томах. – М.: Изд-во МГУ, 1963.
10. Суорц Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. В 2-х томах / пер. с англ. – М.: Наука, 1987.
11. Физический энциклопедический словарь. / Под ред. акад. А.М.Прохорова – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944с.
12. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов – М.: Физ.-Мат. Литература, 1974. – 942с.

## Предметный указатель

---

*Анионы* 41

*Анод* 41

### **Гармоники колебаний**

- амплитуда 58

- фаза 58

- частота 58

### **Глубина**

- модуляции 59

- проникновения 85

*Гиперзвук* 19

*Давление* 15

*Децибелы* 21

*Диамагнетики* 46

*Дисперсия света* 76

*Дифракция света* 77

*Диэлектрик* 39

### **Диэлектрическая проницаемость**

- вакуума 25

- относительная среды 25, 31

*Длина волны* 21

*Доза* 81

### **Закон**

- Бугера 85

- Бугера-Беера 86

- Вина (смещения) 88

- Джоуля-Ленца 41

- Кулона 24

- Ньютона 11

- Ома 39, 60

- Снеллиуса 75

- сохранения энергии 12

- Стефана-Больцмана 88

- электролиза Фарадея 41

### **Заряд**

- отрицательный 24

- положительный 24

- точечный 25

- электрический 24

- неподвижный 23

- движущийся 35

- элементарный 26

*Излучение* 13, 68, 88

*Импеданс среды* 20, 70

*Индуктивность* 50

### **Индукция**

- магнитная 44, 45

- электрическая 30

- электромагнитная 65

*Интенсивность* 20

*Интерференция* 77

*Инфразвук* 19

### **Источник**

- напряжения 38

- электродвижущей силы (э.д.с.) 38

*Катионы* 41

*Катод* 41

*Квант света* 91

### **Колебания**

- амплитуда 17

- гармонические 17, 53

- звуковые 19

- механические 17

- период 18

- поперечные 17

- продольные 17

*Колебательный контур* 63

### **Компонента**

- нормальная 15

- тангенциальная 15

*Конденсатор* 32

### **Коэффициент**

- отражения 82

- поглощения 82

- преломления 70

- пропускания 82

- экстинкции 86

*Магнитная восприимчивость* 46

**Магнитная проницаемость**

- вакуума 45
- среды относительная 45

*Магнитный поток* 45

*Меандр* 53

**Модуляция**

- амплитудная 59
- частотная 60

**Мощность**

- источника излучения 14
- мгновенная 63
- механическая 14
- реактивная 63
- электрическая 42

*Намагниченность* 46

*Напряжение* 33

**Напряженность**

- магнитного поля 45
- электрического поля 27

*Оптика геометрическая* 76

*Оптический диапазон спектра* 78

*Освещенность* 81

*Отражение полное внутреннее* 79

*Парамагнетики* 46

*Период колебаний* 18

**Плотность мощности**

- звуковой волны 20
- спектральная 80
- электромагнитной волны 68

*Плотность тока* 42

*Показатель ослабления* 85

**Поле**

- действующих сил 11
- консервативное 32
- магнитостатическое 43
- сил тяготения 11
- электромагнитное 66
- электростатическое 30

**Поляризация**

- электромагнитной волны 67
- электростатическая среды 29

**Постоянная**

- Больцмана 13
- Вина 88
- гравитационная 11
- магнитная 45
- Планка 90
- Стефана-Больцмана 88
- электрическая 25

**Потенциал** 27, 33

- разность 33

**Правило**

- буравчика (правого винта) 47
- левой руки 46

*Работа* 13

*Рассеяние света* 83

*Резонанс* 22, 62

*Световод* 79

*Световой поток* 80

**Сила**

- Лоренца 46
- механическая 10
- сторонняя 38
- тока 37
- - мгновенное значение 55
- - действующее значение 55
- центральная 25
- электродвижущая 38

*Силовая линия поля* 28

*Скважность импульсов* 56

**Сопротивление**

- активное 39, 62
- волновое 71
- емкостное 61
- индуктивное 61
- комплексное 61
- полное 61
- реактивное 62
- удельное проводника 42

*Спектр частот* 22, 58

*Спектральный анализ* 58

*Собственная частота колебаний* 22

*Теорема Фурье* 58

*Теплота* 13

### **Ток электрический 35**

- знакопеременный 54

- знакопостоянный 54

- импульсный 54

- конвекционный 35

- модулированный 53, 58

- переменный 54

- постоянный 38

- проводимости 37

- смещения 35

- утечки 39

*Ультразвук* 19

### **Уравнения**

- Максвелла 66

- фотометрические 82

*Фаза колебаний* 19

*Ферромагнетики* 46

*Фокус линзы* 76

*Фотометрия* 79

*Фотохимическое действие света* 79

### **Частота**

- колебаний 18

- - круговая 18

- - Томсоновская 63

- модуляции 59

- несущая 59

### **Шкала**

- абсцисс 18

- ординат 18

- электромагнитных волн 72

*Энергетическая экспозиция* 81

*Електроемкость взаимная* 34

*Электролюминесценция* 94

*Электромагнит* 48

*Электромагнитная волна* 66, 67

*Электрострикция* 30

*Электрохимический эквивалент вещества* 41

*Элемент гальванический* 33

### **Энергия**

- механическая 12

- закон сохранения 12

- излучения 13

- кванта света 89

- кинетическая 12

- покоя 13

- потенциальная 12

- теплового движения 13

### **Эффект**

- Доплера 19

- Пельтье 41

- фотоэлектрический 79

**Дмитрий Алексеевич Рогаткин,  
Нонна Юрьевна Гилянская**

**ИЗБРАННЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ  
ДЛЯ ФИЗИОТЕРАПЕВТОВ**

Главный редактор: *В.Ю.Кульбакин*  
Ответственный редактор: *Е.Г.Чернышова*  
Редактор: *М.Н.Ланцман*  
Корректоры: *Е.В.Мышева, Л.Ю.Шанина*  
Компьютерный набор и верстка: *Д.В.Давыдов, А.Ю.Кишканов*

ISBN 5-98322-284-8



9 785983 222847

Лицензия ИД №04317 от 20.04.01 г.  
Подписано в печать 15.01.07. Формат 84×108/32.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 3,5 п.л.  
Гарнитура Таймс. Тираж 1000 экз. Заказ № 162.

Издательство «МЕДпресс-информ».  
119048, Москва, Комсомольский пр-т, д.42, стр. 3  
Для корреспонденции: 105062, Москва, а/я 63  
E-mail: office@med-press.ru  
www.med-press.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в филиале ГУПТО «ТОТ» Ржевская типография.  
г. Ржев Тверской обл., ул. Урицкого, 91.