



А.В. АГАНОВ

МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Часть 1

**Механика.
Молекулярная физика**



КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.В. АГАНОВ

МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Часть 1

Механика.

Молекулярная физика



КАЗАНЬ

2019

УДК 53:60
ББК 22.3:5
А23

*Печатается по рекомендации учебно-методических комиссий
Института физики и Института фундаментальной медицины и биологии
Казанского федерального университета*

Рецензент от ФУМО «Физика и астрономия»
доктор физико-математических наук, профессор **А.Н. Бабушкин**

Рецензенты:
доктор физико-математических наук, профессор **А.В. Анисимов;**
доктор физико-математических наук, профессор **Д.А. Таюрский;**
доктор медицинских наук, профессор **Т.Л. Зефилов;**
доктор медицинских наук, профессор **Ю.А. Чельшев**

Аганов А.В.

А23 Медицинская физика / А.В. Аганов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. – Часть 1.
Механика. Молекулярная физика. – 336 с.

ISBN 978-5-00130-185-1 (Ч. 1)

ISBN 978-5-00130-186-8

Учебное пособие представляет собой краткий курс общей физики для медико-биологических специальностей под названием «Медицинская физика» и соответствует утвержденной Программе «Медицинская физика» для факультетов (институтов) классических университетов. Но в пособии более детально рассмотрены некоторые трудно усваиваемые разделы курса общей физики, важные в плане понимания места физики в медицине, особенно в той части, которая близка к повседневной жизни. Пособие адресовано, прежде всего, студентам медико-биологических специальностей в качестве основной литературы, но как дополнительная может быть рекомендовано и студентам-физикам (бакалавриатов «Физика» и «Биотехнические системы и технологии»), ориентирующимся на продолжение обучения в магистратуре «Медицинская физика». Большая часть материала может быть рекомендована как теоретическое введение к выполнению лабораторных работ общего (для студентов медико-биологических специальностей) и специализированного (в магистратуре «Медицинская физика») практикумов по медицинской физике. Первая часть состоит из следующих разделов: механика, колебания и волны, основы молекулярно-кинетической теории вещества, начала термодинамики, физические системы и явления (процессы). Во Введении рассмотрены этапы становления современного естествознания в контексте места физики и физических методов исследования в развитии фундаментальной и клинической медицины.

Материал изложен в сжатой и доступной для восприятия форме. Книга хорошо иллюстрирована, имеет обширный список литературы, которая свободно доступна в интернет-ресурсах. В Приложения вынесен материал, несколько выходящий за пределы основной Программы курса «Медицинская физика», но важный в общеобразовательном и познавательном плане.

Автор выражает благодарность д. ф.-м. н., профессору Д.А. Таюрскому, принявшему активное участие в формировании концепции курса и за критические замечания, д. м. н., профессору И.А. Латфуллину за консультации и конструктивные замечания по освещению медико-биологических вопросов, к. ф.-м. н., доцентам: Л.Ф. Галиуллиной, А.В. Халиуллиной, А.Р. Юльметову и А.В. Дуглаву за тщательный просмотр рукописи и полезные замечания по материалу курса общей физики, инженеру кафедры медицинской физики Н.Ф. Галиуллиной за помощь в изготовлении рисунков и подготовки рукописи к изданию.

УДК 53:60
ББК 22.3:5

ISBN 978-5-00130-185-1 (Ч. 1)
ISBN 978-5-00130-186-8

© Аганов А.В., 2019
© Издательство Казанского университета, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	10
МЕХАНИКА	33
РАЗДЕЛ 1 МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА	35
1.1. Кинематика	36
1.1.1. Кинематика материальной точки	36
1.1.2. Кинематика твердого тела	44
1.2. Динамика твердого тела.	47
1.2.1. Динамика материальной точки	48
1.2.2. Динамика поступательного движения твердого тела	50
1.2.3. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета	54
1.2.4. Гравитационное взаимодействие. Сила тяжести и вес....	62
1.2.5. Невесомость и перегрузка	66
1.2.6. Физиологические аспекты воздействия невесомости и перегрузки на человека.....	70
1.2.6.1. Невесомость.....	71
1.2.6.2. Перегрузки	74
1.3. Деформации и упругие силы. Механические свойства живых тканей	81
1.3.1. Деформации и упругие силы	81
1.3.2. Механические свойства живых тканей	83
1.4. Силы трения	90
1.5. Работа и энергия. Динамика вращательного движения	93
1.5.1. Работа и энергия. Закон сохранения энергии	93
1.5.1.1. Потенциальная энергия	95
1.5.1.2. Кинетическая энергия	98
1.5.2. Динамика вращательного движения	101
1.5.2.1. Момент силы	102
1.5.2.2. Уравнение динамики вращательного движения тела	103

1.5.2.3. Закон сохранения момента импульса. Уравнение моментов	108
1.5.3. Биомеханическая мускульная работа	110
РАЗДЕЛ 2. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА	120
2.1. Давление и сжимаемость	120
2.2. Элементы гидро(аэро)динамики	122
2.3. Вопросы гемодинамики	128
2.3.1. Кровь как объект исследования движения жидкости	128
2.3.2. Уравнение неразрывности струи при протекании крови в сосудах человека	131
2.3.3. Работа сердца. Пульсовая волна.....	136
2.2.4. Физические основы клинического метода измерения давления крови	148
2.2.5. Артериальное давление и эластичность сосудов	152
РАЗДЕЛ 3. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....	156
3.1. Гармонические колебания	157
3.1.1. Затухающие колебания	160
3.1.2. Вынужденные колебания	162
3.2. Звуковые волны (звук)	163
3.2.1. Плоская продольная гармоническая волна	163
3.2.2. Физические параметры звука	167
3.2.3. Распространение звука	174
3.2.4 Звуковые методы исследования. Аускультация и перкуссия	185
3.3. Ультразвук и животный мир	191
3.4. Применение ультразвука в биологии, медицине и других областях. Краткий обзор	192
3.5. Инфразвук	196
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	200
РАЗДЕЛ 4. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВЕЩЕСТВА И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА	204

4.1. Определения. Введение в молекулярно-кинетическую теорию вещества	204
4.1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества	206
4.1.2. Изопроцессы в идеальном газе	207
4.1.3. Распределение Максвелла	210
4.1.4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории	213
4.1.5. Барометрическая формула. Распределение Больцмана	216
4.2. Физические свойства атмосферы	219
4.3. Высотная болезнь	223
4.4. Влияние погружения под воду (давления) на человека	231
РАЗДЕЛ 5. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ	238
5.1. Термодинамическое состояние и температура	239
5.2. Первое начало термодинамики. Работа в изопроцессах	243
5.3. Второе и третье начала термодинамики	249
5.3.1. Принципы построения тепловых машин	249
5.3.2. Второе начало термодинамики. Энтропия	251
5.3.3. Статистическое представление энтропии. Теорема Нернста, третье начало термодинамики	256
5.3.4. Термодинамические функции и потенциалы	260
РАЗДЕЛ 6. ФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЯВЛЕНИЯ (ПРОЦЕССЫ)	264
6.1. Реальные газы. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Сжижение газов	264
6.2. Структура и общие свойства жидкостей. Поверхностные явления	273
6.2.1. Простейшая модель жидкости. Основные свойства жидкости	273
6.2.2. Поверхностные явления	278
6.3. Кристаллическое состояние	281
6.4. Тепловые свойства кристаллов	284
6.5. Явления переноса	291

6.6. Растворы. Осмос	296
6.7. Вопросы фармакокинетики	300
Вместо заключения	304
Приложение 1. Жизнедеятельность человека в условиях высокогорья	312
Приложение 2. Витальные зоны организмов	316
Приложение 3. Проникновение животных на большие высоты ..	321
Приложение 4. Проникновение насекомых на большие высоты .	323
Приложение 5. Вертикальное распространение обитателей морских глубин	324
Приложение 6. Эволюция основного закона природы – закона сохранения вещества и энергии	326
ЛИТЕРАТУРА	332

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие представляет собой первую часть курса «Медицинская физика» (курса общей физики для студентов медико-биологических специальностей), которое предполагает, что в нем рассматривается взаимосвязь физики и медицины. Основные положения курса общей физики изложены в различных учебниках (учебных пособиях). В данном пособии за основу принят конспект лекций курса общей физики для нефизических специальностей, объем, содержание, последовательность изложения которого соответствуют утвержденной программе [1а–1в], учебные пособия: частично [1г, д]. В целях самообразования можно использовать [1е]. Имеется немало учебников (учебных пособий), в которых с той или иной степенью полноты рассмотрены основные разделы курса общей физики и приложения к решению различных медико-биологических задач, в том числе доступных в Интернет – ресурсах (они приведены по тексту). Введение компетентностного подхода изменили структуру учебных планов и организацию образовательного процесса так, что значительную часть материала студенты должны осваивать в режиме практико-ориентированных занятий и самостоятельной работы. Это вполне отвечает пожеланиям студентов, отраженным в результатах анкетирования выпускников, в диаде «знать – уметь» сместить акценты в сторону большей практической направленности освоения дисциплины. Однако объем теоретического курса общей физики для нефизических специальностей, как правило, сокращен до такой степени (34 часа на полный курс), что утрачивается целостность восприятия далеко не простого для освоения материала. Клипово-дайджестный метод освоения дисциплин с использованием Интернет – ресурсов типичен для большинства студентов любых специальностей – нового Интернет поколения. Между тем физика, физические методы в разной форме и степени не только входят в практику врача-исследователя и врача-клинициста, но становятся едва ли не главным инструментом меди-

цинского обследования (например, комплекс: доплероскопия, кардиография, УЗИ, КТ, МРТ и т.п.) и медико-биологических исследований. Курс «Медицинская физика» – а это всего лишь 18 лекций от механики до ядерной физики, охватывает только основные разделы общей физики с разной степенью освещения взаимосвязи того или иного явления физики с медицинскими приложениями. Часть теоретического курса дополнительно осваивается на практических занятиях в лаборатории общего практикума «Медицинская физика», где предусмотрено выполнение лабораторных работ по курсу общей физики медико-биологической направленности (120 часов в год). Естественно, представленного материала вполне достаточно для подготовки студента к аттестации по данному курсу. Но главная цель этого курса – пробудить интерес будущих медиков к физике и осознать значимость ее изучения для более глубокого освоения выбранной профессии, как путем самостоятельного изучения материала, так и в ходе дискуссии, которую достаточно просто организовать в часы, отведенные на лабораторный практикум. Подобранный материал – это наиболее яркие с точки зрения автора примеры взаимосвязи физики и медицины, наиболее важная и полезная для любого человека информация, и те фрагменты курса общей физики, которые традиционно плохо усваиваются студентами или не освещены в курсе лекций. При составлении данного учебного пособия использовались источники, находящиеся в свободном доступе в Интернете (по крайней мере, для чтения), в том числе энциклопедии, учебники (учебные пособия), труднодоступные в печатном виде. Поэтому для удобства читателей названия тем, разделов, подразделов и т.п. являются ключевыми словами при поиске материала в Интернете. Приведены и ссылки на первоисточники, но тексты и рисунки могут не совпадать, поскольку весь материал был подвергнут проверке и корректировке, как в плане достоверности материала, так и с целью придать единообразие стилю и форме, соответствующим образовательному продукту. Порядок изложения и названия разделов соответствуют стандартной программе курса общей физики.

Но при рассмотрении медицинских приложений в текущем разделе для восприятия материала, зачастую, необходимы базовые знания по физике, изложенные в последующих разделах. Поэтому в каждом отдельном случае приведена соответствующая ссылка.

Наиболее близким по содержанию и объему учебным пособием для студентов медико-биологических специальностей классических университетов является пособие [1ж].

Полагаем, что учебное пособие окажется полезным и для студентов бакалавриатов «Физика», «Биосистемы и биотехнологии», ориентирующихся на продолжение обучения в магистратуре по направлению «Медицинская физика», и для магистрантов, уже обучающихся по программе магистратуры «Медицинская физика» в качестве краткого теоретического введения к выполнению лабораторных работ специального практикума «Медицинская физика».

ВВЕДЕНИЕ

Физика – это наука о наиболее общих свойствах и формах движения материи, основа всего естествознания. Влияние природных явлений, использование различных физических воздействий на человека (солнечного света, термальных вод и т.п.) для лечебных целей известно с древних времен. Как области знания физика и медицина развивались, взаимно обогащая друг друга, несколько столетий. Но четкого их разграничения не было, и наши великие предшественники были многогранными естествоиспытателями. Разделение на самостоятельные области знания появилось лишь тогда, когда начала создаваться доказательная база (экспериментальная) и математический аппарат, на основе которых были установлены количественные соотношения – законы.



М. Борн
(1882–1970 гг.)

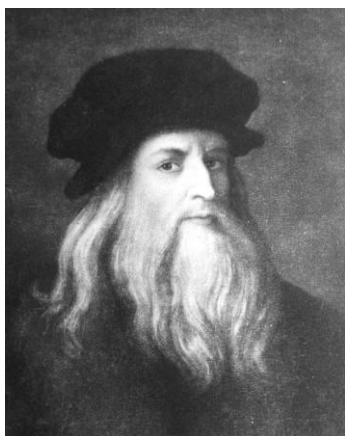
Эволюция представлений о явлениях природы и методологии их познания изложена Максом Борном* в книге (сборнике статей) «Физика в жизни моего поколения»: *«Наши органы чувств являются теми каналами, через которые природа дает нам знать о себе. Их свойствами определяются границы того, что доступно нашим чувствам или интуитивному восприятию. Чем дальше мы идем вглубь истории естественных наук, тем большую мы находим зависимость естественной картины мира от свойств органов и чувств. Более ранняя физика делилась на механику, акустику, оптику и теорию теплоты. Мы видим в этом делении связь с органами чувств, с восприятием движения, ощущениями звука, света и теп-*

* Макс Борн (нем. *Max Born*; 11.12.1882, Бреслау – 5.01.1970, Гёттинген) – немецкий и британский физик-теоретик и математик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1954). Член ряда научных обществ мира, в том числе иностранный член Академии наук СССР (1934) (Борн, М. Физика в жизни моего поколения [Текст]: сборник статей: [переводы] / М. Борн; под общ. ред. и с послесл. [с. 465–534] С.Г. Суворова. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 535 с.).

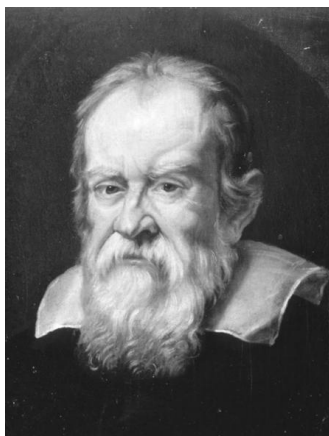
лоты. Решающую роль при образовании понятий здесь все еще играют качества субъекта. Развитие точных наук вывело естествознание из этого состояния, указав ему цель, которая, хотя и далека от достижения ее, однако отчетливо вырисовывается перед нами. Эта цель заключается в создании такой картины мира, которая не была бы ограничена рамками возможного восприятия или интуиции, а являлась бы абстрактной конструкцией понятий, которая имела бы цель представить совокупность всех экспериментов в единообразной и непротиворечивой форме.

В наше время понятие механической силы представляется абстракцией, у которой с субъективным ощущением силы общим является лишь одно наименование. Механическая масса перестала быть атрибутом исключительно осязаемых тел, а является также свойством пустого пространства, заполненного одним эфирным излучением. Область слышимых звуков предстает как очень узкая область в мире невоспринимаемых колебаний, физическое отличие которых от воспринимаемых колебаний обязано исключительно тому случайному свойству человеческого уха, благодаря которому оно реагирует только на определенный интервал частот. Современная оптика является специальной главой теории электричества и магнетизма, которая рассматривает электромагнитные колебания всех длин волн, начиная с самых коротких γ -лучей радиоактивных веществ (с длиной волны порядка одной стомиллионной миллиметра); затем она переходит к рентгеновским лучам, ультрафиолетовым, видимому свету, инфракрасным лучам вплоть до самых длинных – радиоволн (волны Герца, длина которых исчисляется многими километрами). В потоке невидимого света, доступного умственному взору физика, глаз человека почти слеп, ибо слишком мал интервал колебаний, которые он превращает в ощущения. И точно так же теория теплоты является лишь одним из специальных разделов механики и электродинамики. Ее основные понятия абсолютной температуры, энергии и энтропии являются исключительно тонкими логическими построениями точной науки; и здесь мы снова видим, что только одни названия еще напоминают о субъективных переживаниях тепла или холода. Неслышимые звуки, невидимый свет, невоспринимаемое тепло – все это со-

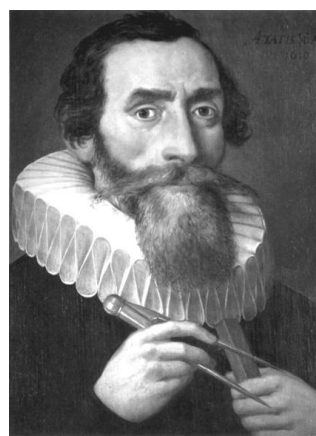
ставляет мир физики, холодный и мертвый для того, кто хотел бы познать живую природу, постичь ее связи и гармонии и в благоговейном восторге созерцать ее величие» (стр. 10–12).



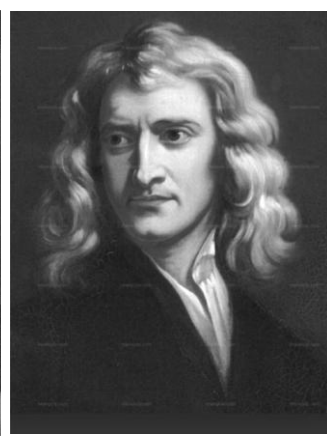
Леонардо
да Винчи
(1452–1519 гг.)



Г. Галилей
(1564–1642 гг.)



И. Кеплер
(1571–1630 гг.)

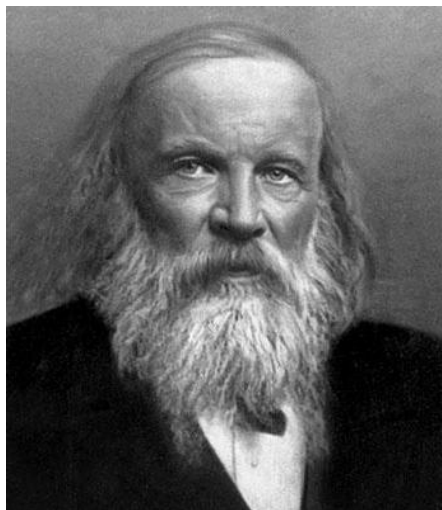


И. Ньютон
(1643–1727 гг.)

Как известно, научное знание (современное естествознание) берет начало с наблюдательной астрономии, успехи которой обязаны появлению зрительной трубы (телескопа), открывшей окно во Вселенную. Ее создание связано с именами И. Кеплера и Г. Галилея – основоположника экспериментальной физики. Однако, следует отметить, что первые рисунки зрительной трубы были сделаны одним из крупнейших представителей эпохи Возрождения Леонардо да Винчи на столет раньше. Первое научное описание результатов астрономических наблюдений – это эмпирические законы движения планет, установленные И. Кеплером в 1609–1619 гг. Основываясь на этих законах, И. Ньютон вывел закон всемирного тяготения. В своем основном труде «Математические начала натуральной философии» (1686 г.) он фактически предложил целостную математическую модель, которая включала закон тяготения, законы движения и систему методов для математического исследования (математический анализ). С этого времени берет начало классическая физика.

Химия. Прошло столетие. А. Лавуазье вводит понятие о химических элементах (1789 г.), в начале 19 века формируются атомно-молекулярные представления, согласно которым каждый химический элемент рассматривался как отдельный вид атома (Д. Дальтон и др.).

Логическим следствием было открытие Д.И. Менделеевым* периодической зависимости свойств химических элементов от их массы (Периодическая таблица Менделеева). В 1912–1914 гг. была внесена принципиальная поправка в периодический Закон Менделеева: периодичность изменения свойств элементов определяется не атомным



Д.И. Менделеев
(1834–1907 гг.)

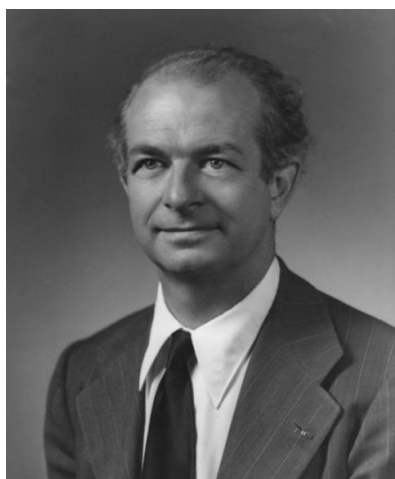
весом (массой), а зарядом ядра, равным атомному номеру, и числом электронов, окружающих ядро. Их распределение и определяет химические свойства элементов. Эта поправка основывалась на законе Г. Мозли (1913 г.), согласно которому частота характеристического рентгеновского излучения (т.е. спектр излучения атома химического элемента) связана с его порядковым номером. Но в статье** приводится более поздняя дата зарождения современной химии – 1923 г. – выход статьи Л. Полинга***, по-

священной рентгеноструктурному анализу кристаллов молибдита. По времени это совпало с формированием квантовой физики, квантовых идей в химии.

* Дмитрий Иванович Менделеев – русский учёный-энциклопедист: химик, физик, метролог, экономист, технолог, геолог, метеоролог, нефтяник, педагог, воздухоплаватель, приборостроитель. Профессор Санкт-Петербургского университета; член-корреспондент по разряду «физический» Императорской Санкт-Петербургской Академии наук. Среди наиболее известных открытий – периодический закон химических элементов, один из фундаментальных законов мироздания, неотъемлемый для всего естествознания. Автор классического труда «Основы химии».

** Borman, S. Chemistry Crystallizes Into Modern Science. The past 75 years have marked profound changes in the content, scope, and direction of the field [Text] / S. Borman, R. Dagani, R.L. Rawls, P.S. Zurer // Chemical & Engineering News. 1998. Copyright 1998 by the American Chemical Society. <http://pubs.acs.org/cen/hotarticles/cenear/980112/crystal2.html>

*** Лайнус Карл Полинг (англ. *Linus Carl Pauling*; 28.02.1901, Портленд, Орегон – 19.08.1994, Биг-Сюр, Калифорния) – американский химик, кристаллограф, лауреат двух Нобелевских премий: по химии (1954) и премии мира (1962), а также Международной Ленинской премии «За укрепление мира между народами» (1970).



Л.К. Полинг
(1901–1994 гг.)

Биология и медицина. Здесь, прежде всего, следует начать с создания микроскопа, применения его к изучению живых организмов. Это выдающееся достижение принадлежит А. Левенгуку*, который сочетал в себе качества механика – самородка и естествоиспытателя. Освоив ремесло шлифовальщика, Левенгук стал очень искусным и успешным изготовителем линз. Устанавливая свои линзы в металлические оправы, он собрал микроскоп (всего он создал около 500 линз и, как минимум, 25 микро-

скопов, 9 из которых дошли до наших дней – они дают 275-кратное увеличение) и с его помощью проводил самые передовые по тем временам исследования.

Наблюдаемые объекты Левенгук зарисовывал, а свои наблюде-



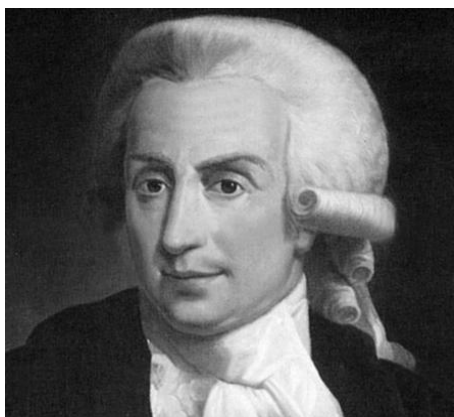
А. Левенгук
(1632–1723 гг.)

ния описывал в письмах, которые на протяжении более чем 50 лет отсылал в Лондонское королевское общество, а также некоторым учёным. В 1673 г. одно из них впервые было опубликовано в журнале Лондонского королевского общества «Философские записки» (*Philosophical Transactions*). Вероятнее всего, с этого времени берет начало доказательная медицина. Им были открыты эритроциты, описаны бактерии (1683 г.), дрожжи, простейшие, волокна хрусталика, чешуйки эпидермиса кожи, зарисованы сперматозоиды (1677 г.) и т.д.**

* Антони ван Левенгук (*Antoni van Leeuwenhoek, Thonius Philips van Leeuwenhoek*; 24.10.1632 – 26.08.1723, Делфт, Нидерландия) – натуралист, конструктор микроскопов, основоположник научной микроскопии. Имеются сведения, что микроскоп был создан Г. Янсенем и З. Янсенем тоже в Нидерландах, приблизительно в 1590 г. Упоминаются и другие фамилии.

** Значителен и вклад Р. Гука, наблюдавшего в усовершенствованном им микроскопе живые клетки (*cell*). Термин «*cell*» введён Р. Гуком (см. Микрография (*Micrographia*), 1666 г.).

18 век ознаменовался созданием учения об электричестве и электрофизиологии. Одним из основателей является Л. Гальвани*.



Л. Гальвани
(1737–1798 гг.)

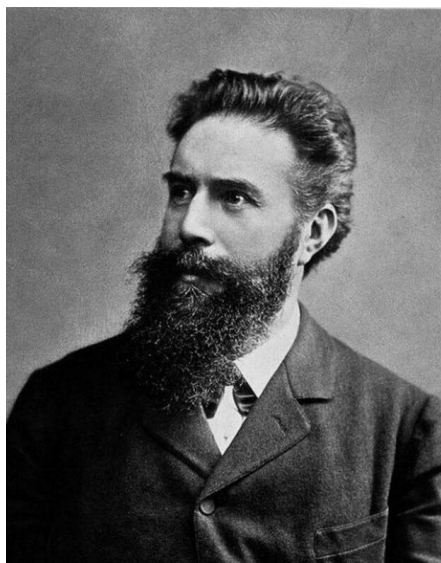
Ему принадлежат первые исследования электрических явлений при мышечном сокращении («животное электричество»). В 1791 г. в «Трактате о силах электричества при мышечном движении» было описано это знаменитое открытие. Л. Гальвани предположил, что мышца является своеобразной батареей лейденских банок, непрерывно возбуждаемой действием мозга, которое передается по нервам. Имя Гальвани сохранилось и в на-

звании некоторых т.н. гальванических аппаратов и процессов. Среди последователей Гальвани был А. Вольта. Следует отметить, что работам Л. Гальвани предшествовали работы английского анатома Дж. Уолша, который доказал электрическую природу удара ската, и шотландского хирурга и анатома Дж. Хантера, давшего точное описание электрического органа этого морского животного (1773 г.). Л. Гальвани также обнаружил возникновение разности потенциалов при контакте разных видов металла и электролита.

На первый взгляд представляется странным, что основной закон природы – закон сохранения энергии был сформулирован врачом Р. Майером (19 век). Отметим, что М. Ломоносову принадлежит первенство лишь в установлении закона сохранения вещества (18 век) (эти вопросы в деталях рассмотрены в данной книге). Но это только на первый взгляд: жизнь первобытного человека зависела от огня (тепла – внешней энергии) и пищи (внутренней энергии, доставляемой в организм человека с пищей – веществом). Впрочем, как и сегодня.

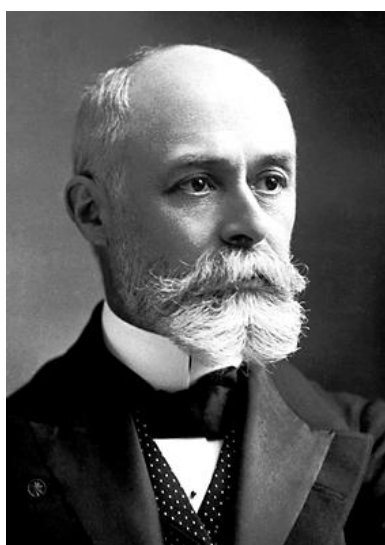
* Луиджи Гальвани (итал. *Luigi Galvani*, 09.09.1737 – 4.12.1798) – итальянский врач, анатом, физиолог и физик, один из основателей электрофизиологии и учения об электричестве, основоположник экспериментальной электрофизиологии.

Врачи и развитие физики – отдельная тема, выходящая за пределы данной книги. Рассмотрим основные последующие открытия в физике, «идущие от физики» и оказавшие влияние на развитие биологии и медицины.



В.К. Рентген
(1845–1923 гг.)

На рубеже 19–20 веков были сделаны два величайших открытия, которые оказали революционизирующее влияние на развитие науки и человечество: открытие В.К. Рентгеном* нового типа электромагнитного излучения, названного им X-лучами (в отечественной литературе более распространено название – рентгеновские лучи) и открытие А. Беккерелем** спонтанной (самопроизвольной) радиоактивности.



А.А. Беккерель
(1852–1908 гг.)

Первое открытие датируется 22 декабря 1895 г., когда В.К. Рентген сделал публичное сообщение о нем в Физическом институте Вюрцбургского университета. А 28 декабря 1895 года в журнале Вюрцбургского физико-медицинского общества была опубликована его статья под названием «О новом типе лучей». Уже в начале 1896 г. попытки найти ответ на вопрос о природе X-лучей привели А.А. Беккереля к случайному, как иногда пишут, открытию радиоактивности. И вскоре к исследованиям

* Вильгельм Конрад Рентген (Рёнтген); нем. *Wilhelm Conrad Röntgen*; 27.03.1845 – 10.02.1923) – немецкий физик, первый в истории науки лауреат Нобелевской премии (1901).

** Антуан Анри Беккерель (фр. *Antoine Henri Becquerel*; 15.12.1852 – 25.08.1908) – французский физик, Нобелевская премия по физике «В знак признания его выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиоактивности», присуждена совместно с Пьером и Марией Кюри (1903).

спонтанного излучения вещества (ядер) приступили Пьер и Мария Кюри (Склодовская-Кюри).

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны в диапазоне от $\sim 10^3$ до $\sim 10^{-2}$ Å (от $\sim 10^{-7}$ до $\sim 10^{-12}$ м). Благодаря высокой энергии (этой шкале электромагнитных волн соответствуют энергии фотонов в интервале от ~ 10 эВ до ~ 1 МэВ, т.е. между энергиями квантов ультрафиолетового и гамма-излучения), рентгеновское излучение способно проникать глубоко внутрь непрозрачных в видимом диапазоне материалов. Это свойство рентгеновских лучей проявилось уже в ходе первых экспериментов, и практические возможности рентгеноскопии, в том числе в медицинской диагностике (известное как рентгеновское обследование, рентгеноскопия, рентгенография), были очевидны сразу, но В.К. Рентген отказался от подписания любого коммерческого контракта, связанного с использованием его открытия. Он придерживался того мнения, что его открытие принадлежит всему человечеству и не должно быть объектом патентования, лицензирования и заключения контрактов. Результатом этого, несомненно, явилось широкое распространение дешевых источников рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение является ионизирующим. Как впоследствии выяснилось, такое воздействие на ткани живых организмов может быть причиной лучевой болезни, лучевых ожогов и злокачественных опухолей и является мутагенным фактором.

Опасное влияние радиоактивного излучения на живые организмы, к сожалению, было понято много лет спустя после открытия. Интенсивные исследования его свойств начались лишь в середине 20 века. Практические применения радиоактивного излучения сформировали новую область медицины – лучевую терапию – предтечу ядерной медицины, которая сегодня бурно развивается во всем мире. Ядерная медицина – раздел клинической медицины, где занимаются применением радионуклидных фармацевтических препаратов в диагностике и лечении. Иногда к ядерной медицине относят также методы дистанционной лучевой терапии. Родоначальником радиоизотопной диаг-



Д. де Хевеши
(1885–1966 гг.)



М. фон Лауэ
(1879–1960 гг.)

ностики считают венгра Д. Хевеши*, предложившего в 1913 году использовать в биологических исследованиях метод меченых атомов.

Отметим, что уже в 1901 году французские физики А. Данло и Э. Блок впервые применили радий для лечения кожного туберкулёза. Американский изобретатель телефона А. Белл предложил в 1903 году использовать радий для лечения опухолей. В СССР его применение началось в 1923 году для облегчения болей в суставах**. В 1929 году Э. Лоуренс изобрёл циклотрон (резонансный циклический ускоритель ионов), ставший главным инструментом для получения радионуклидов.

Другое важнейшее направление в использовании рентгеновского излучения – создание метода рентгеноструктурного анализа (РСА), основанного на явлении дифракции рентгеновских лучей, открытого в 1912 г. М. Лауэ*** (первые рентгеновские спектры назывались лауэграммами). С использованием метода РСА было сделано множество крупных открытий, из них около 20 были отмечены Нобелевскими премиями. Одно из них уже было приведено

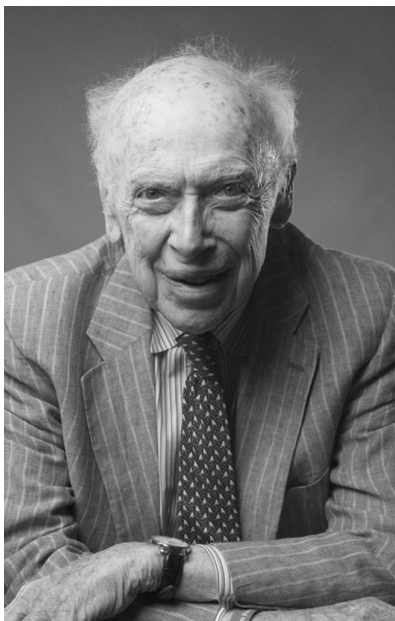
* Дьёрдь де Хевеши (Георг Чарльз де Хевеши или Георг Карл фон Хевеши) венг. *Hevesy György*, нем. *Georg Karl von Hevesy*; 1 августа 1885, Будапешт – 5 июля 1966, Фрайбург, ФРГ) – венгерский химик, лауреат Нобелевской премии по химии (1943) «За работу по использованию изотопов в качестве меченых атомов при изучении химических процессов», один из открывателей гафния.

** Первая монография «Радий в биологии и медицине» датирована 1911 г. (Е.С. Лондон).

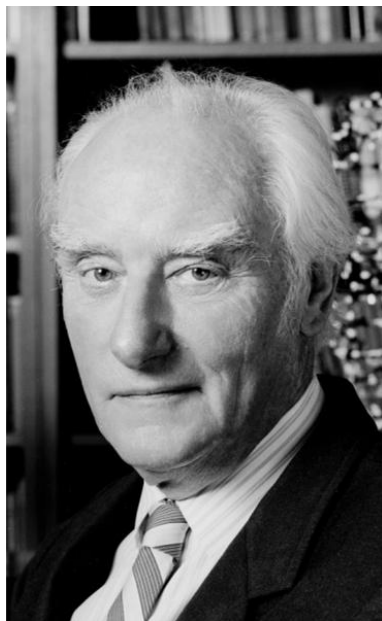
*** Макс фон Лауэ (нем. *Max von Laue*; 09.10.1879, Кобленц, Германская империя – 24.04.1960, Западный Берлин) – немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1914) «За открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах».

выше. Отметим только те из них, которые оказали принципиально важное влияние на развитие биологии и медицины.

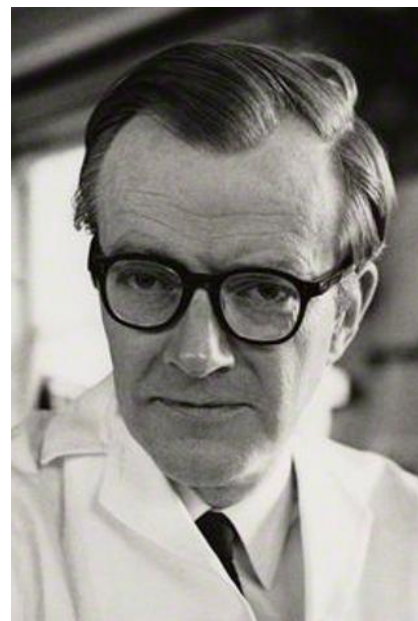
Первое открытие в этом ряду – установление трехмерной структуры дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК – известную как двойная спираль) – молекулы, содержащей всю наследственную информацию, было сделано в 1953 г. Дж. Уотсоном, Ф. Криком и М. Уилкинсом*.



Д.Д. Уотсон
(1928 г.)



Ф. Крик
(1916–2004 гг.)



М.Х.Ф. Уилкинс
(1916–2004 гг.)

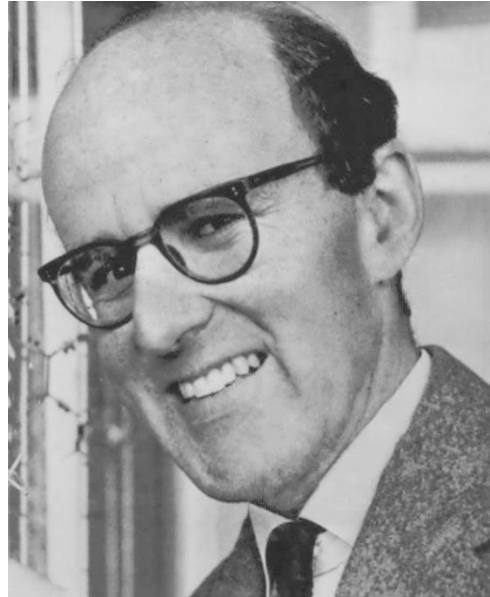
Важность открытия, за которое они были удостоены Нобелевской премии по физиологии и медицине (1962 г.), подчеркнута самой формулировкой: «за открытия, касающиеся молекулярной структуры нуклеиновых кислот и их значение для передачи информации в живых системах». В 1959 году были определены трехмерные структуры белков миоглобина (Дж. Кендрю) и гемоглобина (М. Перутц)*.

* Джеймс Дьюи Уотсон (*James Dewey Watson*, 06.04.1928) – американский биолог. Фрэнсис Крик (*Francis Harry Compton Crick*; 08.06.1916 – 28.07.2004) – британский молекулярный биолог, биофизик и нейробиолог. Морис Хью Фредерик Уилкинс (*Maurice Hugh Frederick Wilkins*, 15.12.1916 – 05.10.2004) – английский физик и молекулярный биолог.

* Джон Коудери Кендрю (англ. *Sir John Cowdery Kendrew*; 24 марта 1917, Оксфорд, Англия – 23 августа 1997, Кембридж, Англия) – английский биохимик, специалист в области молекулярной биологии и Макс Фердинанд Перутц (нем.



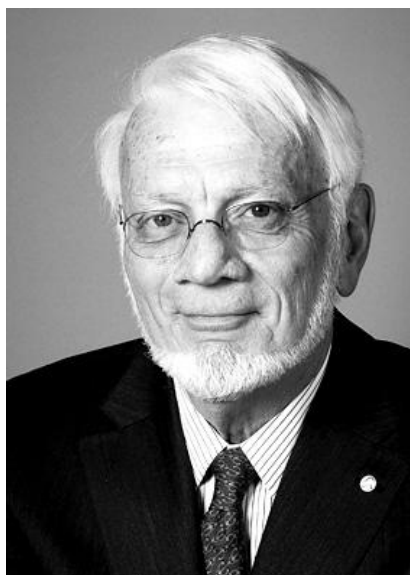
Д.К. Кендрю
(1917–1997 гг.)



М.Ф. Перуц
(1914–2002 гг.)

Как известно, миоглобин – кислородсвязывающий белок скелетных мышц и мышцы сердца. Функция миоглобина заключается в создании в мышцах кислородного резерва, который расходуется по мере необходимости, восполняя временную нехватку кислорода. Гемоглобин – сложный железосодержащий белок животных, обладающих кровообращением, способный обратимо связываться с кислородом, обеспечивая его перенос в ткани. У позвоночных животных он содержится в эритроцитах, у большинства беспозвоночных растворён в плазме крови (эритрокруорин) и может присутствовать в других тканях. Т.е. миоглобин выполняет приблизительно те же функции, что и гемоглобин эритроцитов в крови. Эти открытия середины прошлого века положили начало (формальной датой считается 1953 г.) современной генетике и молекулярной (структурной) биологии.

Max Ferdinand Perutz; 19.05.1914, Вена – 06.02.2002, Кембридж) – английский биохимик австрийского происхождения, специалист в области молекулярной биологии. Удостоены Нобелевской премии по химии «За исследования структуры глобулярных белков»(1962).



Т. Стейц
(1940 г.)



В. Рамакришнан
(1952 г.)



А. Йонат
(1939 г.)



К. Вютрих
(1938 г.)

Вторая половина 20 века ознаменовалась еще двумя крупными открытиями в молекулярной биологии. Одно из них – определение с помощью метода РСА структуры и функции важнейшей компоненты белок-синтезирующего аппарата клетки человека рибосомы – не мембранного органоида (органеллы) живой клетки, служащего для биосинтеза белка из аминокислот по заданной матрице на основе генетической информации, предоставляемой матричной РНК (мРНК).

Действие более 40 % всех известных антибиотиков, применяемых в клинике, направлено на работу рибосом. В этом направлении работало

много исследовательских групп, но приоритет открытия был отдан Т. Стейцу, В. Рамакришнану и А. Йонат*.

* Томас Стейц (англ. *Thomas Steitz*, род. 23.08.1940 года, Милуоки) – американский учёный-кристаллограф, Венкатраман Рамакришнан (*Venkatraman Ramakrishnan*; род. в 1952 году, Чидамбарам, Тамилнад, Индия) – британский учёный-биохимик, Ада Йонат (урождённая *Лифшиц*, род. 22.06.1939 года, Иерусалим) – израильский учёный-кристаллограф, удостоены Нобелевской премии по химии за 2009 год с формулировкой «За исследования структуры и функций ри-

Другое выдающееся достижение – это разработка К. Вютрихом* (1985 г.) метода спектроскопии ЯМР для расшифровки трехмерной структуры биологических макромолекул в растворе. (За открытие ЯМР (1945–1946 гг.) Ф. Блох и Э. Парселл были удостоены Нобелевской премии по физике за 1952 г.). Отметим, что этому предшествовало открытие также магнитного резонанса, но в виде электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), сделанное Е.К. Завойским в Казанском университете в 1944 г. Оба метода нашли широкое применение в медико-биологических исследованиях.



Ф. Блох
(1905–1983 гг.)



Э. Парселл
(1912–1997 гг.)



Е.К. Завойский
(1907–1976 гг.)

Как известно, для проведения рентгеноструктурного анализа необходимо получить белок в кристаллической форме. Но получение кристаллического белка – задача сложная и не всегда её удаётся решить. Спектроскопия ЯМР также позволяет устанавливать пространственную структуру белков, как в кристаллической форме, так и в растворе, т.е. в наиболее естественной его форме в живом организме, но дает возможность проводить и исследование динамики белковых молекул, процессов комплексообразования и т.д.

босомы».

* Курт Вютрих (нем. *Kurt Wüthrich*, род. 04.10.1938 года, посёлок Арберг, Швейцария) – швейцарский химик, лауреат Нобелевской премии по химии 2002 года.

И, наконец, создание лазеров и лазерной медицины. Лазер, или оптический квантовый генератор (англ. *laser*, акроним от «*light amplification by stimulated emission of radiation* – усиление света посредством вынужденного излучения») – это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного электромагнитного излучения. С момента своего создания лазеры зарекомендовали себя как «готовые решения ещё неизвестных проблем».

Первый генератор в микроволновом диапазоне (мазер) на аммиаке был создан в 1954 г. За эту работу Ч. Таунс, Н.Г. Басов и А.М. Прохоров* были удостоены Нобелевской премии по физике 1964 г.



Ч. Таунс
(1915–2015 гг.)



Н.Г. Басов
(1922–2001 гг.)



А.М. Прохоров
(1916–2002 гг.)

* Лауреаты Нобелевской премии по физике за 1964 г. с формулировкой «За фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на принципе мазеров – лазеров»: Чарлз Хард Таунс (англ. *Charles Hard Townes*; 28.07.1915, Гринвилл, Южная Каролина – 27.01.2015) – американский физик, Член Национальной академии наук США (1956), иностранный член Российской академии наук (1994).

Николай Геннадиевич Басов (14.12.1922, город Усмань, Тамбовская губерния – 1.07.2001) – советский и российский физик, Ленинская (1959) и Государственная (1989) премии, Дважды Герой Социалистического Труда (1969, 1982).

Александр Михайлович Прохоров (11.07.1916, Атертон, штат Квинсленд, Австралия – 8.01.2002, Москва) – советский физик, один из основоположников важнейшего направления современной физики – квантовой электроники.

В медицине лазеры широко применяются в хирургии как бескровные скальпели, используются при лечении офтальмологических заболеваний (катаракта, отслоение сетчатки, лазерная коррекция зрения и др.). Широкое применение лазеры получили также в косметологии (лазерная эпиляция, лечение сосудистых и пигментных дефектов кожи, лазерный пилинг, удаление татуировок и пигментных пятен).

Спустя почти три столетия после создания оптического микроскопа был создан электронный микроскоп, позволяющий получать изображение объектов с максимальным увеличением до 10^6 раз. В 1931 году Р. Руденберг получил патент на просвечивающий электронный микроскоп (позднее появились другие модификации), а в 1932 г. М. Кнолль и Э. Руска* построили первый прототип современного прибора.

В просвечивающем электронном микроскопе для формирования изображения вместо светового потока используется электронный пучок. Электронный пучок создается посредством катода. Полученный электронный пучок ускоряется обычно до 80–200 кэВ (используются различные напряжения от 20 кВ до 1 МВ), фокусируется системой магнитных линз (иногда электростатических линз), проходит через образец так, что часть электронов рассеивается на образце, а часть – нет. Таким образом, прошедший через образец электронный пучок несет информацию о структуре образца. Далее пучок проходит через систему увеличивающих линз и формирует изображение на люминесцентном экране, фотопластинке или ПЗС*– камере. Разрешающая способность электронного микроскопа в 1000–10000 раз превосходит разрешение традиционного светового микроскопа и для лучших современных приборов может быть меньше одного ангстрема ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{ м}=0,1\text{ нм}$).

* Эрнст Август Фридрих Руска (нем. *Ernst August Friedrich Ruska*; 25.12.1906, Гейдельберг – 27.05.1988, Западный Берлин) – создатель электронного микроскопа, лауреат Нобелевской премии по физике за 1986 г.

* ПЗС-матрица – специализированная аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов, выполненная на основе кремния, использующая технологию ПЗС – приборов с зарядовой связью.



Э.А.Ф. Руска
(1906–1988 гг.)



Г.К. Бинниг
(1947 г.)



Г. Рорер
(1933–2013 гг.)

Использование просвечивающего электронного микроскопа для научных исследований было начато в конце 1930-х годов, когда были получены первые изображения некоторых вирусов (вируса табачной мозаики и бактериофагов). В настоящее время электронная микроскопия нашла наиболее широкое применение в цитологии, микробиологии и вирусологии, обусловив создание новых отраслей науки. В электронной микроскопии биологических объектов применяют специальные методы приготовления препаратов. Это необходимо для выявления отдельных компонентов изучаемых объектов (клетка, бактерия, вирус и т.д.), а также для сохранения их структуры в условиях высокого вакуума под воздействием потока электронов. При помощи электронной микроскопии изучается внешняя форма объекта, молекулярная организация его поверхности, с помощью метода ультратонких срезов исследуется внутреннее строение объекта.

Электронная микроскопия в сочетании с биохимическими, цитохимическими методами исследования, иммунофлюоресценцией, а также рентгеноструктурным анализом дает информацию о составе и функции структурных элементов клеток и вирусов.

В 1981 году Г.К. Бинниг и Г. Рорер* создали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) в его современном виде (принципы этого класса приборов были заложены ранее другими исследователями), первый в ряду т.н. зондовых микроскопов. В СТМ острая металлическая игла подводится к образцу на расстояние порядка 0,1 нм. При подаче на иглу небольшого относительно образца потенциала возникает туннельный ток. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния образец-игла: типичные значения силы тока $1 \div 1000$ пА (пикоампер, $1 \text{ пА} = 10^{-12} \text{ А}$) при расстоянии образец-игла около 0,1 нм.

В процессе сканирования игла движется вдоль поверхности образца, туннельный ток поддерживается стабильным за счёт действия обратной связи, и показания следящей системы меняются в зависимости от топографии поверхности. Такие изменения фиксируются, и на их основе строится карта высот. Другая методика предполагает движение иглы на фиксированной высоте над поверхностью образца. В этом случае фиксируется изменение величины туннельного тока и на основе данной информации идёт построение топографии поверхности. Существенным ограничением сканирующей туннельной микроскопии было требование наличия электрической проводимости исследуемых образцов. С изобретением сканирующего атомно-силового микроскопа возможности сканирующей зондовой микроскопии стали практически неограниченными по объектам, вплоть до исследований структуры белка, нуклеиновых кислот и других биологических молекул в жидких средах. Зондовая туннельная микроскопия расширила возможности нанотехнологий, позволив не только визуализировать отдельные атомы, но и манипулировать ими.

Известны и другие выдающиеся результаты в биологии и медицине, полученные на основе физики, равно как и методы исследова-

* Герд Карл Бинниг (нем. *Gerd Karl Binnig*; род. 20.07.1947) – немецкий физик и Генрих Рорер (нем. *Heinrich Rohrer*; 06.06.1933, Букс – 16.05.2013, Воллерау) – швейцарский физик вместе с Э. Руска были удостоены Нобелевской премии по физике 1986 года.

ния, анализа и диагностики. Но в рамках Введения к курсу не представляется возможным даже их краткое описание.

Рассмотрим только ряд физических методов исследования, которые произвели революцию в медицинской диагностике – превратили медицинскую диагностику из искусства в науку и составляют сегодня основу современной клинической диагностики.

Это методы визуализации внутренних органов человека. В настоящее время существует множество взаимодополняющих методов визуализации изображений (интроскопии) в медицине. Медицинская интроскопия решает две, в известной степени независимые, задачи. Первая – это собственно визуализация внутренних органов (определение их формы, размеров, расположения и т.д.). Вторая – определение физических, физико-химических и иных свойств биологических тканей и характера их функционирования. Достоинства каждого из методов проявляются при решении второй задачи, в частности, при анализе специфики взаимодействия излучения, используемого для визуализации, с различными биологическими тканями в организме.

Все виды визуализации основаны на физике взаимодействия излучения и вещества. Необходимо, чтобы излучение проникало в тело и частично рассеивалось им. Т.е. тело должно быть полупрозрачным для излучения. Это условие становится очевидным при рассмотрении двух предельных случаев. Первый случай – тело совершенно непрозрачно для длинноволнового оптического излучения, которое, поэтому, нельзя использовать для получения информации о внутренних структурах. Второй – поток нейтрино, для которого тело полностью прозрачно, вряд ли можно использовать для получения изображений.

Простейший вид визуализации – получение плоского изображения объемного тела, когда объект находится между неподвижным излучателем, например, рентгеновской трубкой и неподвижным экраном – приемником, например, фотопластинкой. При этом элементарная поверхность содержит усредненную информацию о взаимодействии излучения с веществом, получаемую при прохождении через всю тол-

щу объекта. Этот метод визуализации успешно применяют в медицине и поныне со времени создания вышеупомянутого метода рентгеноскопии, а также в ультразвуковой дефектоскопии и диагностике и т.д.

Следующий уровень – это собственно томография – метод исследования внутренней структуры различных объектов, заключающийся в послойном изображении объекта при его облучении (tomos – от греческого – слой, сечение). Существует рентгеновская, радиационная, оптическая, магнитно-резонансная, ультразвуковая томография и т.д. Приведем лишь некоторые из них.

Техника получения изображения отдельных слоев разнообразна. Эти вопросы рассматриваются в специальной литературе. Наиболее совершенные изображения получают путем компьютерной (вычислительной) томографии. И здесь все начиналось с рентгеновских X-лучей. Первые клинические испытания компьютерного рентгеновского томографа, проведенные Г. Хаунсфилдом и А. Кормаком*, датированы 1972–1973 гг.



Г.Н. Хаунсвилд
(1919–2004 гг.)



А.М. Кормак
(1924–1998 гг.)

* Годфри Ньюболд Хаунсфилд (англ. *Godfrey Newbold Hounsfield*; 28.08.1919, Ноттингемшир, Великобритания – 12.08.2004, Великобритания) – британский инженер-электрик и Аллан Маклеод Кормак (англ. *Allan McLeod Cormack*; 23.02.1924, Йоханнесбург, Южная Африка – 07.05.1998, Массачусетс, США) – южноафриканский и американский физики получили Нобелевской премии по физиологии и медицине 1979 года «За разработку компьютерной томографии».

Компьютерная томография (КТ) основана на том, что при просвечивании рентгеновским излучением объекта со сложной внутренней структурой информация об этой структуре может быть восстановлена по вычислению пространственного распределения интенсивности излучения, прошедшего через объект. Таким образом, дифференциальное распределение параметров внутри тела получается в результате решения обратной задачи многолучевого просвечивания образца, дающего исходные интегральные характеристики.

Создание и развитие позитронно-эмиссионная томография – ПЭТ (другое ее название – двухфотонная эмиссионная томография) связано с достижениями в ядерной физике. Это радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Метод основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции* позитронов с электронами. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводится в организм перед исследованием. При аннигиляции позитронов с электронами, находящимися в тканях организма, почти всегда возникает два гамма-кванта. Большинство позитронов, проникающих в ткани, очень быстро теряют энергию и аннигилируют с электронами среды, уже находясь в покое. Поэтому аннигиляционные гамма-кванты имеют нулевой суммарный импульс. Т.е. они излучаются в взаимно противоположных направлениях, но с одинаковыми энергиями – 511 кэВ. Таким образом, если в двух детекторах гамма-квантов, включенных по схеме совпадений, одновременно поглощается гамма-квант с энергией 511 кэВ, то следует ожидать, что точка аннигиляции находится на прямой, соединяющей эти два детектора, на так называемой *линии отклика*. Используя большой набор детекторов, расположенных вокруг исследуемого объекта (или перемещая пару детекторов вокруг объекта), можно постро-

* Аннигиляция – процесс превращения частицы и античастицы (в данном случае соответственно электрона и позитрона) в другие частицы, происходящий при их столкновении.

ить в пространстве множество таких прямых. Все они будут проходить через точки, в которых происходила аннигиляция (то есть через точки, где находится распавшееся ядро радионуклида – с точностью до очень короткой длины пробега позитронов в ткани). Благодаря этому можно выполнить трёхмерную реконструкцию распределения радионуклида в сканируемом объекте.

Магнитно-резонансная томография (МРТ)* – способ получения томографических медицинских изображений для исследования внутренних органов и тканей с использованием явления ЯМР, широко используется не только в диагностике, но и в биомедицинских исследованиях, в том числе в изучении строения и функций мозга. Есть несколько разновидностей МРТ: микро - и минитомография (томография мелких и малых животных) и томография человека.



П. Менсфилд
(1933–2017 гг.)



П.К. Лотербур
(1929–2007 гг.)

* «За изобретение метода магнитно-резонансной томографии» Питер Мэнсфилд (англ. *Peter Mansfield*; 09.10.1933, Лондон, Великобритания – 08.02.2017, Ноттингем, Великобритания) – британский физик, (Ноттингем) и Пол Кристиан Лотербур (англ. *Paul Christian Lauterbur*, 06.05.1929, Сидней, Огайо – 27.03.2007, Урбана, Иллинойс) – американский химик, удостоены Нобелевской премии в области медицины 2003 года.

В конце 1950-х годов Д.Э. Кул, Л. Чепмен и Р. Эдвардс разработали принцип эмиссионной томографии. Позже их работа привела к проектированию и нескольких томографических инструментов. В 1975 г. методы томографического исследования доработали М. Тер-Погосян совместно с Дж. Эуджен-Робинсон, К. Шарп Кук.

Пожалуй, наиболее широкое применение в медицинской диагностике получили ультразвуковые методы визуализации (томографии), которые были разработаны в конце прошлого века. Первые публикации многочисленных авторов, в том числе по клиническим приложениям, датированы 1980–1982 гг. Вопросы использования ультразвука в медицинской диагностике и терапии будут подробно рассмотрены в данном курсе.

Естественно, приведенный материал отражает лишь один, хотя и исключительно важный аспект «Наук о жизни». На это обратил



Э. Шрёдингер
(1887–1961 гг.)

внимание еще полвека назад М. Борн в одной из своих статей цитированного выше сборника: «Мы убеждены в том, что физико-химический аспект ни в коей мере недостаточен для изображения фактов жизни, не говоря уже о фактах мышления».

Приведенные во Введении крупнейшие достижения физики, оказавшие влияние на развитие биологии и медицины, по существу, являются средствами для того, чтобы дать ответ на главный вопрос, который был сформулирован еще в середине прошлого столетия Э. Шрёдингером* «Что такое жизнь с точки зрения физики».

* Шрёдингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики? URL: <http://scisne.net/a-868> (дата обращения 18.07.2016). Эрвин Шредингер – один из создателей волновой квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике.

В популярной форме вопрос звучит так: «Как физика и химия могут описать процессы, протекающие в живых организмах». В последующем эта книга оказала большое влияние на развитие биофизики и молекулярной биологии. Понимание того обстоятельства, что физике принадлежит особая роль в развитии медицины, как фундаментальной, так и клинической, привело к созданию дисциплины «Медицинская физика», выделению ей должного места как у физических, так и у медико-биологических (биомедицинских) направлений подготовки.

Этот курс состоит из двух частей:

Часть 1. «Механика. Молекулярная физика»

Часть 2. «Электричество и магнетизм. Оптика. Основы атомной и ядерной физики».

Первая часть представлена в данном издании.

МЕХАНИКА

Механика – это раздел физики, в котором изучают движение тел друг относительно друга или частей одного и того же тела друг относительно друга (деформация), – основа самостоятельной научной дисциплины и области знания «Биомеханика».

Биомеханика – раздел естественных наук, изучающий на основе моделей и методов механики механические свойства живых тканей, отдельных органов и систем или организма в целом, а также происходящие в них механические явления. Биомеханические исследования охватывают различные уровни организации живой материи: биологические макромолекулы, клетки, ткани, органы, системы органов, а также целые организмы и их сообщества. Чаще всего объектом исследования этой науки является движение животных и человека, а также механические явления в тканях, органах и системах. Под механическим движением понимается движение всей биосистемы в целом, а также движение отдельных частей системы относительно друг друга – деформация системы. Все деформации в биосистемах связаны с биологическими процессами, которые играют решающую роль в движениях животных и человека. Это сокращение мышцы, деформация сухожилия, кости, связок, фасций, движения в суставах. Отдельным направлением биомеханики является *биомеханика дыхательного аппарата*, его упругое и неупругое сопротивление, кинематика (то есть геометрическая характеристика движения) и динамика дыхательных движений, а также другие стороны деятельности дыхательного аппарата в целом и его частей (грудной клетки, лёгких); *биомеханика кровообращения* изучает упругие свойства сосудов и сердца, гидравлическое сопротивление сосудов току крови, распространение упругих колебаний по сосудистой стенке, движение крови, работу сердца и др. *Биомеханика человека* – наука комплексная. Она включает в себя самые разнообразные знания других наук, таких как: механика и математика, функциональная анатомия и физиология, возраст-

тная анатомия и физиология, педагогика, теория физической культуры. Достаточно полная общая информация содержится в [2].

В соответствии с этим определением, представленные в этом пособии разделы 1–3 курса общей физики вкупе с медико-биологическими приложениями можно рассматривать в качестве краткого Введения к курсу «Биомеханика».

РАЗДЕЛ 1 МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Механика, в известной степени условно, подразделяется на кинематику, динамику и статику.

Кинематика – это описание движения, вне связи с причинами, его вызывающего.

Динамика – установление взаимосвязи между воздействием на тело и результатом этого воздействия (изменением состояния движения).

Статика – это частный случай динамики – определение условий равновесия тел.

При описании физических процессов широко используются физические модели (приближения). Введем две из них, необходимые для описания механического движения: «материальная точка» и «абсолютно твердое тело».

Материальная точка – простейшая физическая модель в механике, абстрактное тело бесконечно малого размера. Практически под материальной точкой понимают обладающее массой тело, размерами и формой которого при описании движения можно пренебречь.

Абсолютно твердое тело – совокупность материальных точек, расстояния между которыми сохраняются в процессе любых движений, совершаемых этим телом. Т.е. принимается, что абсолютно твердое тело не изменяет свою форму при воздействии на него (не деформируется).

1.1. Кинематика

1.1.1. Кинематика материальной точки

Для описания движения необходимо:

- ввести точку отсчета и «привязать» к ней систему координат;
- определить способ измерения времени.

Как задать положение материальной точки в пространстве? В наиболее распространенной декартовой системе координат это можно сделать либо посредством координат x , y , z , либо посредством радиус-вектора $\mathbf{r}$ (рис. 1.1а, б), определяемого как

$$\mathbf{r} = ix + jy + kz,$$

где $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ – единичные векторы (орты), направленные вдоль осей координат (используют и другие обозначения: $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y$, $\mathbf{e}_z$).

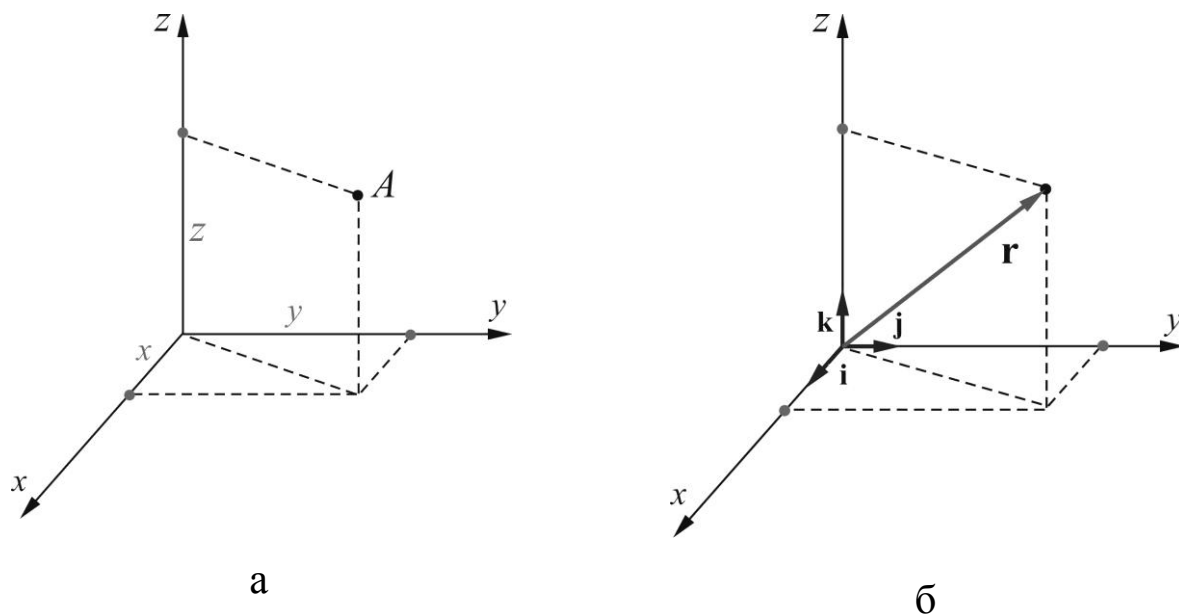


Рис. 1.1. Определение положения точки в декартовой системе координат: а) – посредством координат x , y , z ; б) – посредством радиус-вектора $\mathbf{r}$

Введем основные кинематические понятия.

Траектория – линия, определяющая перемещение материальной точки в пространстве. В общем случае уравнение траектории имеет вид:

$$f(x, y, z) = 0$$

Различают прямолинейную и криволинейную траектории (в частном случае, движение по окружности) и т.п.

Уравнение движения – уравнение (функция), определяющее положение материальной точки в пространстве в любой момент времени:

$$f(x, y, z, t) = 0, \text{ или } x = x(t), y = y(t), z = z(t) \text{ (параметрическая форма), или } \mathbf{r}(t) = \mathbf{i}x(t) + \mathbf{j}y(t) + \mathbf{k}z(t).$$

Скорость. Воспользуемся для описания перемещения временной зависимостью вектора $\mathbf{r}(t)$ (рис. 1.2а). Тогда перемещение за промежуток времени Δt , определяемое как $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ (рис. 1.2б), запишется в виде:

$$\Delta \mathbf{r}(t) = \mathbf{i}\Delta x(t) + \mathbf{j}\Delta y(t) + \mathbf{k}\Delta z(t).$$

Средняя скорость (быстрота) перемещения определяется следующим образом:

$$\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \langle \mathbf{v} \rangle = \mathbf{v}_{cp}. \quad (1.1)$$

Отметим, что модуль (численное значение) приращения радиус-вектора не равен приращению длины радиус-вектора, т.е. $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta |\mathbf{r}|$.

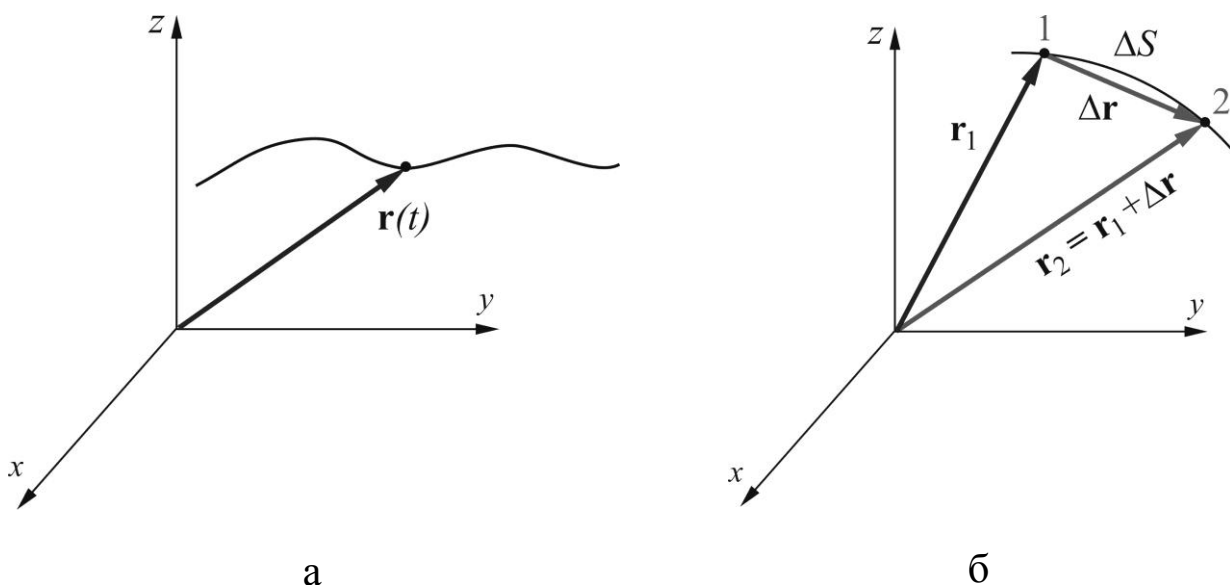


Рис. 1.2. Графическое представление перемещения материальной точки вдоль траектории посредством радиус-вектора $\mathbf{r}(t)$:
а) – положение материальной точки на траектории в произвольный момент времени; б) – $\mathbf{r}_1(t)$ и $\mathbf{r}_2(t)$ – координаты материальной точки в моменты времени t_1 и $t_2 = t_1 + \Delta t$, соответственно;
 $\Delta \mathbf{r}$ – приращение радиус-вектора $\mathbf{r}$ и путь ΔS , пройденный за промежуток времени Δt

Скорость в данный момент времени (мгновенная), т.е. когда интервал измерения времени Δt становится бесконечно малой величиной dt , определяется выражением:

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (1.1a)$$

Как видно на рис. 1.3, при $\Delta t \rightarrow dt$, $\alpha \rightarrow 0$, $\Delta \mathbf{r} \rightarrow d\mathbf{r}$, и вектор скорости (уравнение 1.1a) совпадает с касательной к траектории в данной точке (в данный момент времени). Поскольку $|\Delta \mathbf{r}| \cong \Delta S$, то численное значение скорости равно

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}. \quad (1.1б)$$

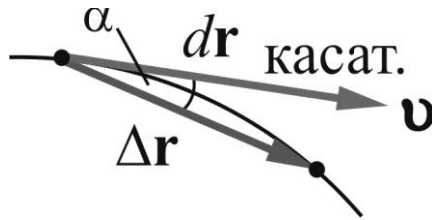


Рис. 1.3. Геометрическое представление мгновенной скорости $\mathbf{v}$

Поскольку $\Delta \mathbf{r}(t) = \mathbf{i}\Delta x(t) + \mathbf{j}\Delta y(t) + \mathbf{k}\Delta z(t)$, компоненты скорости запишутся в виде

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = v_x, \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{dy}{dt} = v_y, \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{dz}{dt} = v_z,$$

и вектор скорости можно представить следующим образом:

$$\mathbf{v} = \mathbf{i}v_x + \mathbf{j}v_y + \mathbf{k}v_z. \quad (1.1\text{в})$$

(Первую производную по времени иногда обозначают так: $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$, $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$, $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$, $\dot{f} = \frac{df}{dt}$ и т.д.).

Ускорение. Если скорость при перемещении по траектории из точки 1 в точку 2 (рис. 1.4а) за промежуток времени Δt изменяется на величину $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$, то средняя величина её изменения, т.е. среднее значение ускорения равно

$$\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \mathbf{a}_{cp}. \quad (1.2\text{а})$$

В пределе при бесконечно малом интервале Δt получаем выражение (1.2б) для мгновенного значения ускорения:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{a} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}, \quad (1.2\text{б})$$

т.е.
$$\mathbf{a} = \mathbf{i} \frac{d^2x}{dt^2} + \mathbf{j} \frac{d^2y}{dt^2} + \mathbf{k} \frac{d^2z}{dt^2}. \quad (1.2\text{в})$$

(Вторые производные по времени обозначаются таким же образом: $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\ddot{z}$, $\ddot{f}$ и т.д.).

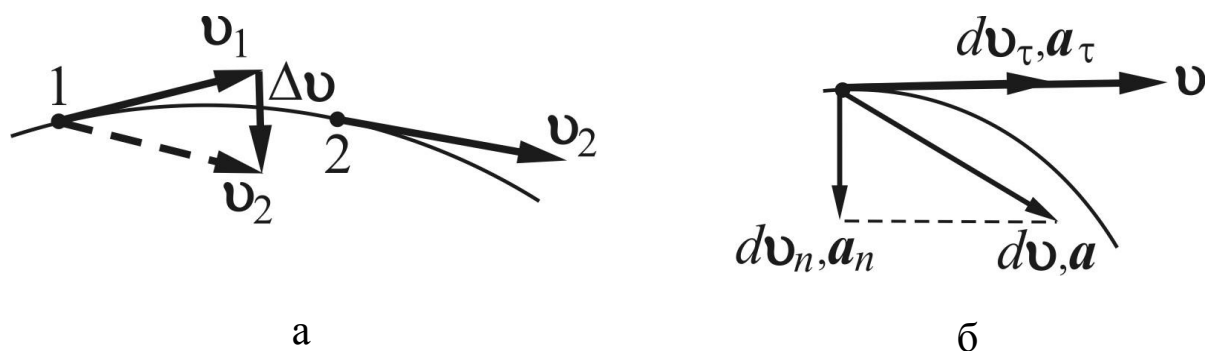


Рис. 1.4. Геометрическое представление: а) – изменения скорости $\mathbf{v}$; б) – соответствующего мгновенного значения ускорения $\mathbf{a}$

Тангенциальное и нормальное ускорения. Скорость может изменяться как по величине, так и по направлению (при движении по криволинейной траектории), при этом $\Delta \mathbf{v}$ и $d\mathbf{v}$ не всегда $\parallel \mathbf{v}$. В общем случае

$$d\mathbf{v} = d\mathbf{v}_\tau + d\mathbf{v}_n, \quad (1.2\text{г})$$

где $d\mathbf{v}_\tau$ – тангенциальное (т.е. направленное по касательной к траектории в данной точке) приращение скорости, характеризующее изменение скорости по величине, а $d\mathbf{v}_n$ – нормальная компонента изменения скорости, (направленная перпендикулярно « $\perp$ » к касательной). Тогда для мгновенного значения ускорения можно записать:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d\mathbf{v}_\tau}{dt} + \frac{d\mathbf{v}_n}{dt} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n, \quad (1.3)$$

где $\mathbf{a}_\tau$ – тангенциальное ускорение, $\mathbf{a}_n$ – нормальное ускорение (рис. 1.46).

Путь. Если есть уравнение траектории $f(x, y, z) = 0$, то пройденный путь – длина отрезка траектории между точками 1 и 2 (рис. 1.5), определяется по формулам аналитической геометрии.

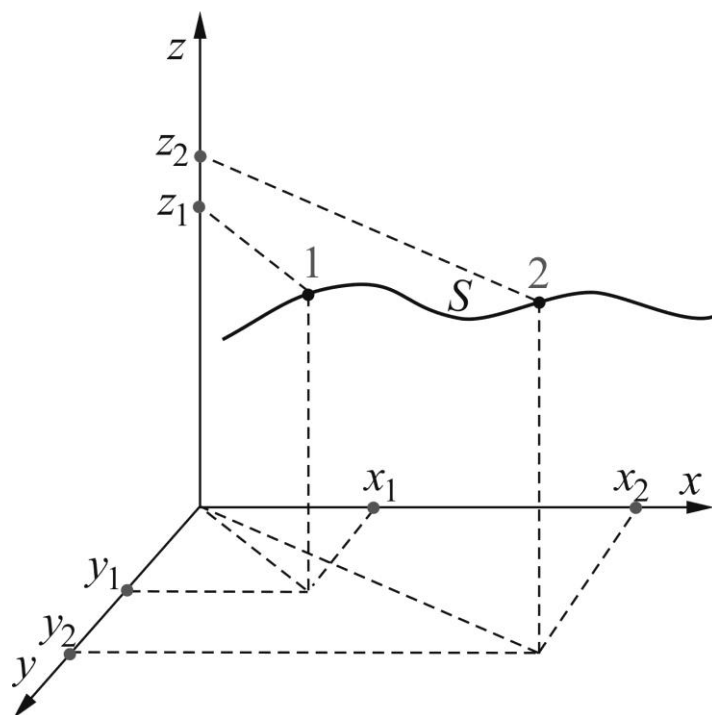


Рис. 1.5. Графическое представление пройденного пути от точки 1 к точке 2 в декартовой системе координат

Если есть уравнение движения, например, в виде временной зависимости скорости $v(t)$ (рис. 1.6), то пройденный путь можно определить следующим образом. Выделим на кривой малый временной интервал Δt_i , внутри которого скорость примем равной v_i . Пройденный элементарный путь равен $\Delta S_i = v_i \Delta t_i$ (на рисунке 1.6 он представлен в виде заштрихованного прямоугольника). Пройденный за промежуток времени от t_1 до t_2 путь определяется суммой величин ΔS_i , которая в пределе при бесконечно малых интервалах Δt_i является интегралом функции $v(t)$ в промежутке времени от t_1 и t_2 :

$$S = \sum \Delta S_i \Rightarrow \sum_{\Delta t_i \rightarrow 0} v_i \Delta t_i \Rightarrow S = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt. \quad (1.4)$$

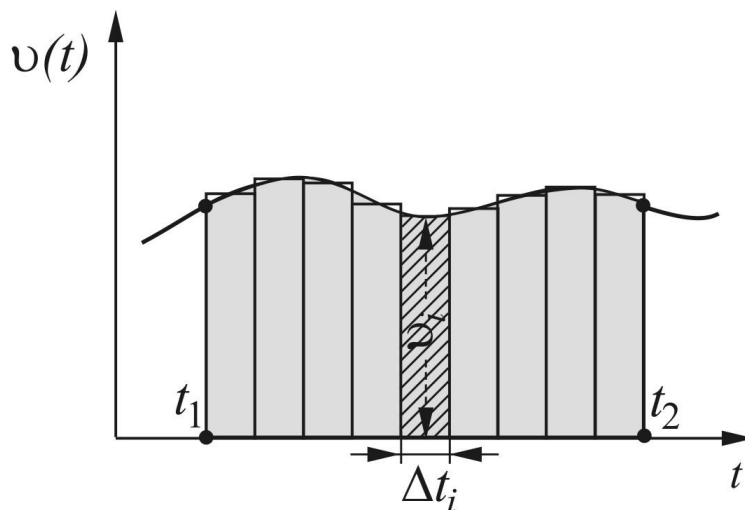


Рис. 1.6. Временная зависимость скорости перемещения $v(t)$.
Пройденный путь изображен затемнённой фигурой

При поступательном равноускоренном движении скорость в произвольный момент времени равна $v_0 \pm at$. Здесь знак «+» соответствует увеличению скорости (ускорению), знак «-» уменьшению скорости (замедлению), где v_0 – начальная скорость. Пройденный за время t путь S определяется как

$$S = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \quad (1.4a)$$

Равномерное движение по окружности. Частный, но важный случай – движение по окружности с постоянной по величине скоростью.

В этом случае изменяется только направление скорости. При перемещении $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ за время Δt по круговой траектории из точки 1 (обозначена буквой A) в точку 2 (B) скорость изменится на величину $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$ (рис.1.7). Сделаем параллельный перенос вектора скоро-

сти $\mathbf{v}_2$ из точки B в точку A . Как видно из рисунка, построенные треугольники AOB и CAD подобны ($\triangle AOB \sim \triangle CAD$): это два равнобедренных треугольника с взаимно перпендикулярными сторонами.

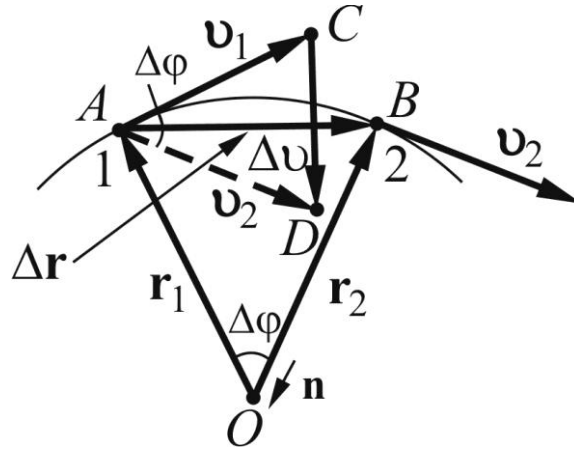


Рис. 1.7. Геометрическое представление перемещения точки по окружности с постоянной по величине скоростью

И поскольку $|\mathbf{r}_1| = |\mathbf{r}_2| = R$, $|\mathbf{v}_1| = |\mathbf{v}_2| = v$, то:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{R} \quad (\approx \Delta \varphi).$$

Тогда $\Delta v = v \frac{\Delta r}{R}$, или $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{R} \frac{\Delta r}{\Delta t}$ и

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{R} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v}{R} \frac{dr}{dt} = \frac{v^2}{R} = a_n \Rightarrow \mathbf{a}_n = a_n \mathbf{n}. \quad (1.5)$$

Здесь a_n – численное значение центростремительного ускорения, $\mathbf{n}$ – единичный вектор, направленный к центру вращения вдоль радиуса вращения, $a_n \mathbf{n}$ – вектор центростремительного ускорения. При движении по произвольной криволинейной траектории (рис. 1.8) мгновенное значение центростремительного ускорения определяется по формуле 1.5, в которой R – радиус кривизны (радиус, вписанной в траекторию

окружности в данной точке траектории, т.е. в данный момент времени).

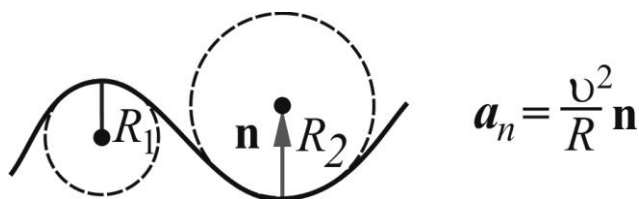


Рис. 1.8. Радиус кривизны в произвольных точках криволинейной траектории. Пунктиром обозначена вписанная окружность

1.1.2. Кинематика твердого тела

Если при перемещении твердого тела в пространстве произвольно выбранная в теле линия сохраняет ориентацию в пространстве или если любые точки тела описывают одинаковые (подобные) траектории, то такое движение тела можно рассматривать как поступательное движение материальной точки (рис. 1.9). Это условие не выполняется, если тело вращается относительно внутренней оси (т.е. проходящей через тело). Согласно фундаментальному принципу механики, если тело совершает сложное движение и его составляющие не зависят друг от друга, то результирующее перемещение будет определяться векторной суммой каждого из них. Поэтому достаточно рассмотреть кинематические характеристики вращательного движения как компонента этого сложного движения.

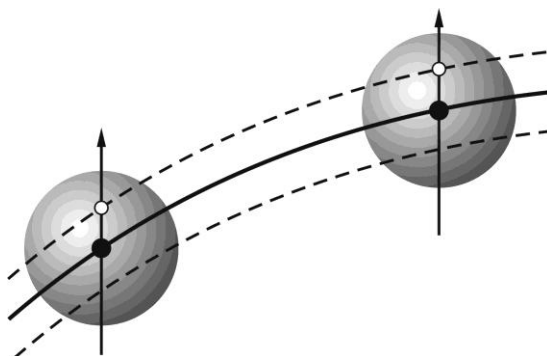


Рис. 1.9. Иллюстрация поступательного движения тела по криволинейной траектории

В простейшем случае, когда симметричное тело, например сферической формы, вращается относительно оси, проходящей через центр симметрии O (рис. 1.10), траектории любой точки тела представляют собой концентрические окружности, центры которых O, O_1, O_2 и т.д. лежат на оси вращения. При этом радиусы вращения R_i за один и тот же промежуток времени Δt поворачиваются на одинаковый угол $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \dots = \Delta\varphi_i = \Delta\varphi$. Эта величина и служит мерой вращения тела. Направление вектора угла поворота $\Delta\varphi$ определяется правилом правого буравчика (винта) – оно совпадает с направлением перемещения «головки» буравчика вдоль оси вращения при круговом движении точки на его рукоятке по часовой стрелке.

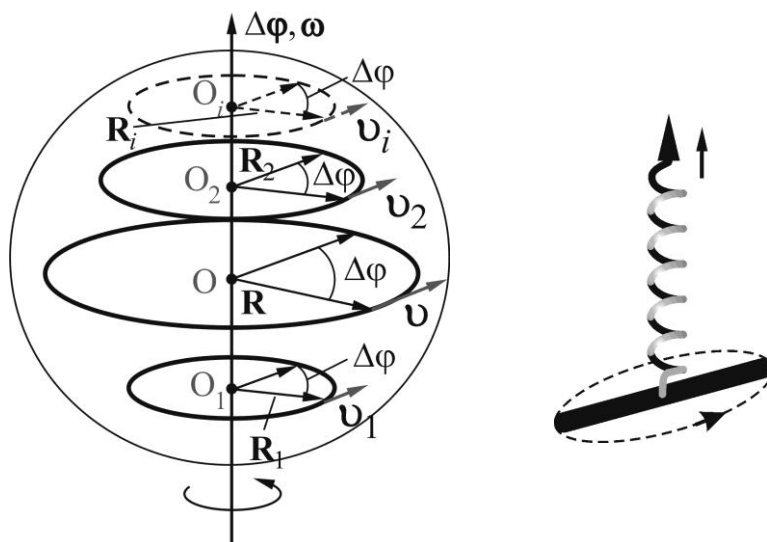


Рис. 1.10. Вращение тела относительно неподвижной оси

Средняя $\omega_{\text{ср}}$ и мгновенная ω угловые скорости вращения определяются соотношениями (1.6) и (1.6a):

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (1.6)$$

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (1.6a)$$

Зависимость линейной скорости $\mathbf{v}$ на круговой траектории от угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ и радиуса вращения $\mathbf{R}$ (рис. 1.11) определяется правилом векторного умножения векторов:

$$\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega} \mathbf{R}]. \quad (1.7)$$

Численное значение скорости равно: $v = \omega R \sin \widehat{\boldsymbol{\omega} \mathbf{R}}$ (в данном случае $v = \omega R$, поскольку угол между векторами $\boldsymbol{\omega}$ и $\mathbf{R}$, обозначенный как $\widehat{\boldsymbol{\omega} \mathbf{R}}$, равен 90°), а направление скорости – правилом правого буравчика: вектор $\mathbf{v}$ направлен перпендикулярно от плоскости, в которой находятся вектора $\boldsymbol{\omega}$ и $\mathbf{R}$, при повороте в направлении от вектора $\boldsymbol{\omega}$ к вектору $\mathbf{R}$ (по часовой стрелке), т.е. в направлении меньшего угла (рис. 1.11).

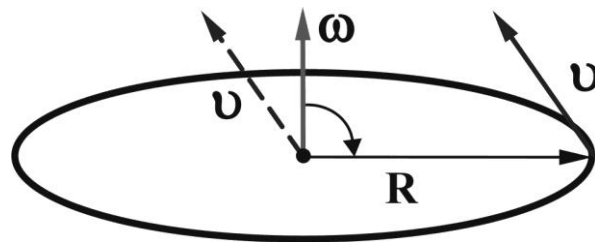


Рис. 1.11 Иллюстрация векторного умножения векторов – правила «буравчика», вектора $\mathbf{v}$ и $\mathbf{R}$ лежат в плоскости $\perp$ вектору $\boldsymbol{\omega}$

В простейшем случае вращения с переменной скоростью при неизменной ориентации оси вращения среднее и мгновенное значения углового ускорения $\beta_{\text{ср}}$ и β соответственно равны:

$$\beta_{\text{ср}} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}, \quad (1.8)$$

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.8a)$$

Направления вектора β при увеличении и уменьшении скорости вращения изображены на рис.1.12. Численные значения тангенциального a_τ , нормального a_n и полного a ускорений материальной точки соответственно равны;

$$a_\tau = \beta R, \quad (1.9)$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R, \quad (1.9a)$$

$$a = \sqrt{\beta^2 R^2 + (\omega^2 R)^2}. \quad (1.9б)$$



Рис. 1.12. Иллюстрации: а) – ускоренного вращения; б) – замедленного вращения твердого тела

1.2. Динамика твердого тела

Динамика – раздел механики, в котором устанавливается взаимосвязь между воздействием на тело и результатом этого воздействия. Как отмечалось во введении, статика – частный случай динамики, это определение условия равновесия тел. Но фактически, статика выведена в самостоятельный раздел механики, поскольку ее ключевые положения лежат в основе расчетов механических конструкций и сооружений и т.п. Такое выделение обосновано, поскольку через некоторое относительно непродолжительное время механические (деформационные) процессы в собранных конструкциях (сооружениях и т.п.) как бы

прекращаются и внешне не проявляются (но статические напряжения остаются). Применительно к живым системам такое разделение некорректно. При подъеме тяжести человек совершает механическое движение, задействованы все части тела. В результате человек зафиксировал груз в некотором статическом положении. Механические процессы прекращены. Но организм человека продолжает работать, в нем интенсивно протекают биохимические и физические процессы, расходуется энергия. Это хорошо известно и используется в спортивной медицине: мышечную массу и, следовательно, силу можно наращивать как динамическими, так и статическими нагрузками (изотонический метод тренировки).

1.2.1. Динамика материальной точки

В основе классической механики лежат три закона, сформулированные И. Ньютоном.

1-й закон гласит так: «Всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит изменить это состояние».

«Покой» и «равномерное прямолинейное движение» по сути одно и то же состояние! Это – естественное состояние тела, поскольку для этого ничего не надо делать.

Свойство тела сохранять состояние покоя или скорость при отсутствии воздействия каких-либо других тел называется инерцией. Системы отсчета, где эти свойства сохраняются, называются инерциальными системами отсчета*. Утверждение о существовании таких систем отсчета составляет суть первого закона механики, именуемого зачастую законом инерции Ньютона (Ньютона-Галилея).

* Экспериментально установлено, что инерциальной системой отсчета является система координат, центр которой совмещен с Солнцем, а оси координат направлены на определенные звезды. Эта инерциальная система называется гелиоцентрической.

В качестве меры инерции используется масса m , которая является и мерой количества вещества, заключенного в некотором объёме. В качестве меры воздействия используется сила $\mathbf{F}$ – векторная величина, характеризующаяся численным значением (модуль вектора), направлением и точкой приложения. Графически сила изображается стрелкой, исходящей из точки ее приложения.

По 2-му закону Ньютона «Ускорение, приобретаемое телом (материальной точкой), прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально его массе»:

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m \quad \text{или} \quad (\mathbf{a}m = \mathbf{F}). \quad (1.10)$$

Согласно уже упоминавшему выше фундаментальному принципу механики – принципу независимости действия сил (движений), если на материальную точку одновременно действуют несколько сил, то каждая сообщает ей ускорение, как если бы других сил не было (эквивалентное утверждение: «если тело участвует в сложном движении, то результирующее перемещение будет определяться векторной суммой перемещений»). Иными словами, перемещение будет происходить под действием результирующей силы (равнодействующей) $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$, определяемой векторной суммой (по правилу параллелограмма, рис. 1.13).

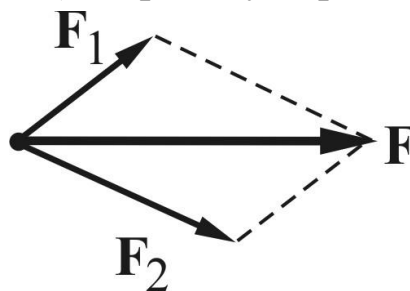


Рис. 1.13. К определению результирующей силы

После несложных преобразований уравнение 1.10 трансформируется в уравнение 1.11

$$m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}, \quad d\mathbf{p} = \mathbf{F}dt. \quad (1.11)$$

Здесь $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ – импульс материальной точки, $\mathbf{F}dt$ – импульс силы. Это иная запись 2-го закона Ньютона, известная как «закон сохранения импульса в изолированной системе»: в отсутствие внешнего воздействия ($\mathbf{F}=0$) импульс системы не меняется ($d\mathbf{p}=0$). Это один из трех основных законов сохранения (интегралов движения) в механике.

3-й закон Ньютона формулируется так: «Сила действия равна силе противодействия» (рис. 1.14).

$$\mathbf{F}_{1,2} = -\mathbf{F}_{2,1} \quad (1.12)$$

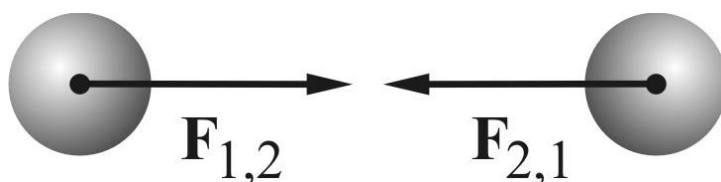


Рис. 1.14. Иллюстрация 3-го закона Ньютона

Важно отметить, что эти силы приложены к разным телам (материальным точкам).

1.2.2. Динамика поступательного движения твердого тела

Рассмотрим вначале поступательное движение совокупности материальных точек, относительное расположение которых не изменяется (рис. 1.15).

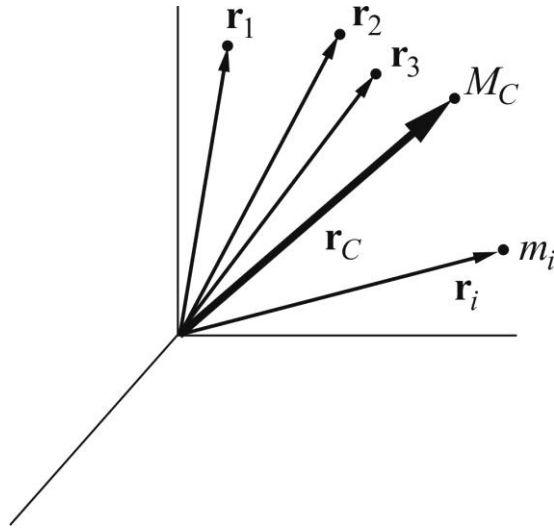


Рис. 1.15. К иллюстрации движения системы материальных точек: $\mathbf{r}_C$ – координата центра инерции (масс), M_C – совокупная масса материальных точек

Импульс материальной точки m_i , перемещающейся со скоростью $\mathbf{v}_i$, вводится как $\mathbf{p}_i = m_i \mathbf{v}_i$. Суммарный импульс этой совокупности материальных точек равен:

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i ,$$

т.е. определяется как векторная сумма импульсов N материальных точек (аддитивно); здесь и далее суммирование производится от 1 до N .

Координата центра инерции (масс) $\mathbf{r}_C$ определяется следующим образом:

$$\mathbf{r}_C = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + \dots + m_i \mathbf{r}_i}{m_1 + m_2 + \dots + m_i} = \frac{\sum m_i \mathbf{r}_i}{\sum m_i = M_C} . \quad (1.13)$$

Дифференцируя выражение 1.13 по времени, получим скорость перемещения центра масс (инерции):

$$\mathbf{v}_C = \frac{d\mathbf{r}_C}{dt} = \frac{\sum m_i \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \sum m_i \mathbf{v}_i}{M_C} = \frac{1}{M_C} \sum \mathbf{p}_i = \frac{1}{M_C} \mathbf{p}_C . \quad (1.14)$$

Иными словами, движение этой совокупности N материальных точек можно рассматривать как движение материальной точки с массой M_C , расположенной в центре инерции (масс) $\mathbf{r}_C$, со скоростью $\mathbf{v}_C$, т.е. обладающей импульсом $\mathbf{p}_C$:

$$\mathbf{p}_C = M_C \mathbf{v}_C. \quad (1.14a)$$

Далее по аналогии получим 2-й закон Ньютона (уравнение движения) для поступательного движения твердого тела (рис. 1.16).

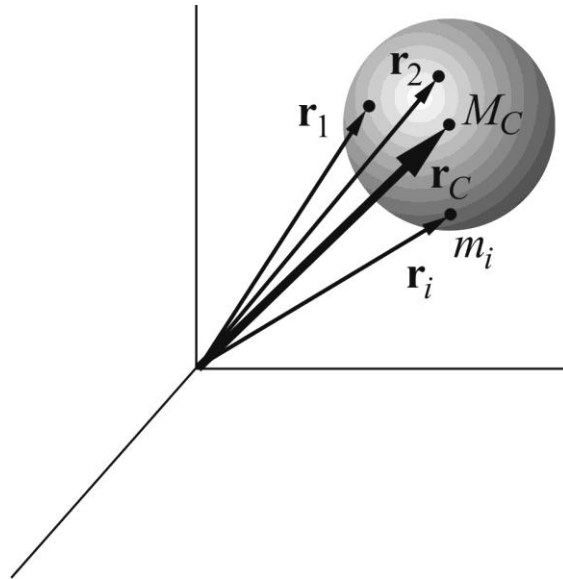


Рис. 1.16. Иллюстрация поступательного движения твердого тела как совокупности бесконечного числа материальных точек

Запишем уравнение движения для элементарной массы m_i под воздействием внутренних ($\mathbf{F}_{ij}^{in}$) и внешних ($\mathbf{F}_i^{ext}$) сил:

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{F}_{ij}^{in} + \mathbf{F}_i^{ext}. \quad (1.15)$$

Здесь $\mathbf{a}_i$ – ускорение элементарной массы m_i (индекс j относится к воздействию элементарной массы m_j на элементарную массу m_i).

Суммируя левую и правую части по всем индексам i и j , получим

$$\sum m_i \mathbf{a}_i = \sum \mathbf{F}_{ij}^{6H} + \sum \mathbf{F}_i^{6U}. \quad (1.15a)$$

Сумма всех внутренних сил по 3-му закону Ньютона равна нулю ($\sum \mathbf{F}_{ij}^{6H} = 0$). Таким образом, движение этой бесконечной совокупности материальных точек, т.е. твердого тела, определяется только действием внешних сил:

$$\sum m_i \mathbf{a}_i = \sum \mathbf{F}_i^{6U}. \quad (1.15b)$$

Воспользуемся определением координаты центра масс системы материальных точек $\mathbf{r}_C = \sum m_i \mathbf{r}_i / M_C$ (1.13), где под m_i подразумевается i -элемент массы тела, сумма которых равна массе тела M_C . Поскольку ускорение элемента массы m_i равно $\mathbf{a}_i = \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2}$, то ускорение $\mathbf{a}_C$ центра масс тела можно записать в виде:

$$\mathbf{a}_C = \frac{d^2 \mathbf{r}_C}{dt^2} = \frac{\sum m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2}}{M_C} = \frac{\sum m_i \mathbf{a}_i}{M_C}.$$

Тогда с учетом уравнения (1.15b), получим:

$$\mathbf{a}_C M_C = \sum \mathbf{F}_i^{6U} = \mathbf{F}, \quad (1.16)$$

т.е. центр инерции (масс, тяжести) движется так, как двигалась бы материальная точка с суммарной массой $M = \sum m_i$ под действием всех приложенных сил (равнодействующей) $\mathbf{F}$.

1.2.3. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Из 1-го закона Ньютона следует, что уравнение движения материальной точки зависит от свойств системы отсчета. Он выполняется в т.н. инерциальных системах отсчета. Легко показать, что таких систем бесконечное множество. Для этого рассмотрим простейший случай: система k' перемещается вдоль координаты x с постоянной скоростью v_{0x} относительно инерциальной системы отсчета k (рис. 1.17). В классической физике принимается, что при скоростях много меньших скорости света время в обеих системах координат течёт одинаково: $t = t'$.

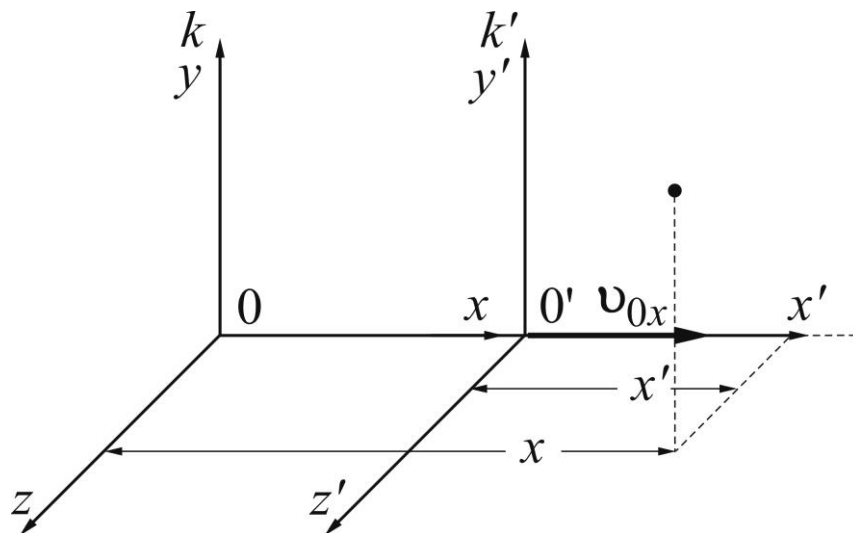


Рис. 1.17. Иллюстрация построения инерциальных систем отсчета

Связь между координатами материальной точки в этих системах координат устанавливается совокупностью четырёх уравнений

$$x = x' + v_{0x}t, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t', \quad (1.17)$$

называемых преобразованиями координат Галилея. Дифференцируя функции координат по времени, получим соотношения для компонент скорости:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \frac{dx'}{dt} + v_{0x}, & \frac{dy}{dt} &= \frac{dy'}{dt}, & \frac{dz}{dt} &= \frac{dz'}{dt}; \\ v_x &= v_x' + v_{0x}, & v_y &= v_y', & v_z &= v_z'.\end{aligned}\quad (1.18a)$$

Аналогичные соотношения можно записать и при движении только вдоль y или z :

$$v_y = v_y' + v_{0y}, \quad v_x = v_x', \quad v_z = v_z', \quad (1.18б)$$

$$v_z = v_z' + v_{0z}, \quad v_x = v_x', \quad v_y = v_y'. \quad (1.18в)$$

Тогда скалярные соотношения (1.18а, 1.18б, 1.18в) для компонент скорости можно представить в векторном виде (графически как на рис. 1.18):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{v}_0. \quad (1.19)$$

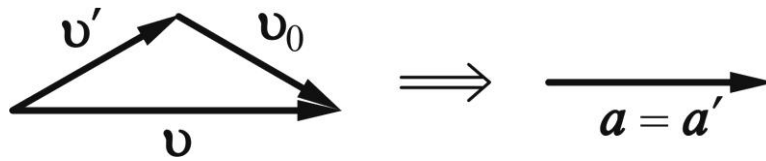


Рис. 1.18. Представление векторов скорости (слева) движения материальной точки и ускорения (справа) в инерциальных системах отсчета

Очевидно, что соотношение (1.19) выполняется при произвольном выборе взаимных направлений осей координат, в то время как, например, соотношение (1.18а) – только при ориентации координатной оси как представлено на рис.1.17. Дифференцирование по времени приводит к соотношению

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv'}{dt}, \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}'. \quad (1.19a)$$

Умножая обе части равенства на массу материальной точки m , получим

$$am = a'm, \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}'. \quad (1.196)$$

Таким образом, приходим к заключению, что законы динамики инвариантны относительно преобразований Галилея (т.е. не изменяются при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую). С механической точки зрения все инерциальные системы равноценны. Проявляется это в том, что никакими механическими опытами в пределах инерциальной системы отсчета невозможно определить, движется ли тело равномерно прямолинейно или покоится. Это утверждение называется принципом относительности Галилея.

Теперь рассмотрим 2 наиболее простых примера движения материальной точки в неинерциальных системах координат.

1. Система координат k' перемещается поступательно относительно инерциальной системы координат k вдоль оси x с ускорением a_{0x} (рис. 1.19).

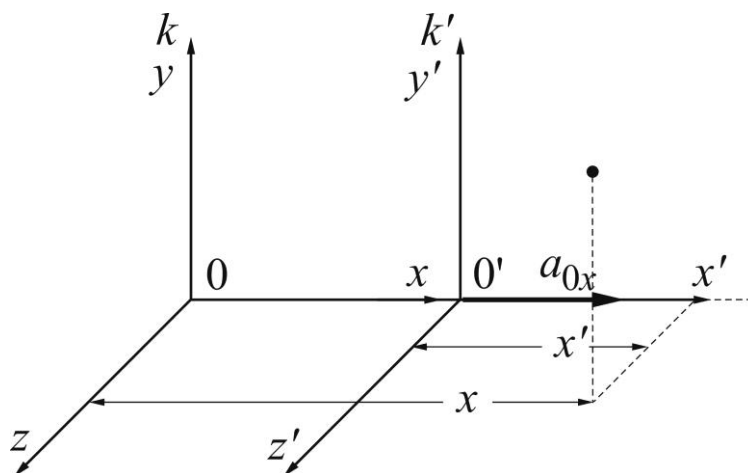


Рис. 1.19. Иллюстрация построения неинерциальной системы координат

Связь между координатами материальной точки в инерциальной системе и движущейся с ускорением a_{0x} системой отсчета устанавливается соотношением (1.20) по аналогии с уравнениями (1.17):

$$x = x' + \frac{a_{0x}t^2}{2}, \quad y = y', \quad z = z'. \quad (1.20)$$

Тогда связь между компонентами ускорения материальной точки в инерциальной и неинерциальной системе координат a_x, a_y, a_z и неинерциальной системе отсчёта $a_{x'}, a_{y'}, a_{z'}$ определяется следующим образом (1.21):

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x'}{dt^2} + a_{0x}, \quad a_x = a_{x'} + a_{0x}, \quad a_y = a_{y'}, \quad a_z = a_{z'}, \quad (1.21)$$

т.е. z – и y – компоненты ускорения остаются неизменными.

Аналогичные соотношения можно записать и при перемещении системы отсчёта k' вдоль оси y или z .

В общем случае ускорение $\mathbf{a}$ материальной точки в инерциальной системе координат связано с ускорением $\mathbf{a}'$ в системе координат, оси которой ориентированы произвольным образом относительно осей координат в системе k и перемещается с ускорением $\mathbf{a}_0$, уравнением (1.21a):

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' + \mathbf{a}_0. \quad (1.21a)$$

Умножая левую и правую части уравнения (1.21a) на m , получим выражение для 2-го закона Ньютона в виде

$$\mathbf{a}m = \mathbf{F} = \mathbf{a}'m + \mathbf{a}_0m, \quad (1.22)$$

из которого следует уравнение динамики материальной точки в неинерциальной системе отсчёта k' :

$$\mathbf{a}'m = \mathbf{F}' = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{in}(= -\mathbf{a}_0m). \quad (1.23)$$

Таким образом, при переходе в неинерциальную систему отсчёта в уравнение движения материальной точки необходимо добавить фиктивную силу, т.н. силу инерции, величина которой определяется относительным ускорением $\mathbf{a}_0$: $\mathbf{F}_{in} = -\mathbf{a}_0m$.

Рис 1.20 демонстрирует проявление силы инерции в неинерциальной системе координат.

При равномерном прямолинейном движении тележки по горизонтальной поверхности груз массой m находится в вертикальном положении. В условиях данного эксперимента, любую систему координат, зафиксированную на поверхности, можно рассматривать как инерциальную. Теперь приведем тележку в движение вдоль того же направления с ускорением $\mathbf{a}_0$. Груз отклонится влево, как показано на рис. 1.20, или вправо (при резком торможении). Относительно системы отсчета, связанной с тележкой, груз покоится в наклонном положении, хотя сумма сил $\mathbf{F}_r + \mathbf{P}$ не равна нулю (здесь $\mathbf{F}_r$ – сила реакции нити, действующая со стороны опоры – места крепления отвеса). Чтобы объяснить, почему груз покоится в ускоренно движущейся тележке, нужно ввести силу инерции $\mathbf{F}_{in} = -\mathbf{a}_0m$, т.е. отклонению груза будет соответствовать условие:

$$\mathbf{a}_0m = \mathbf{F}_r + \mathbf{P}. \quad (1.24)$$

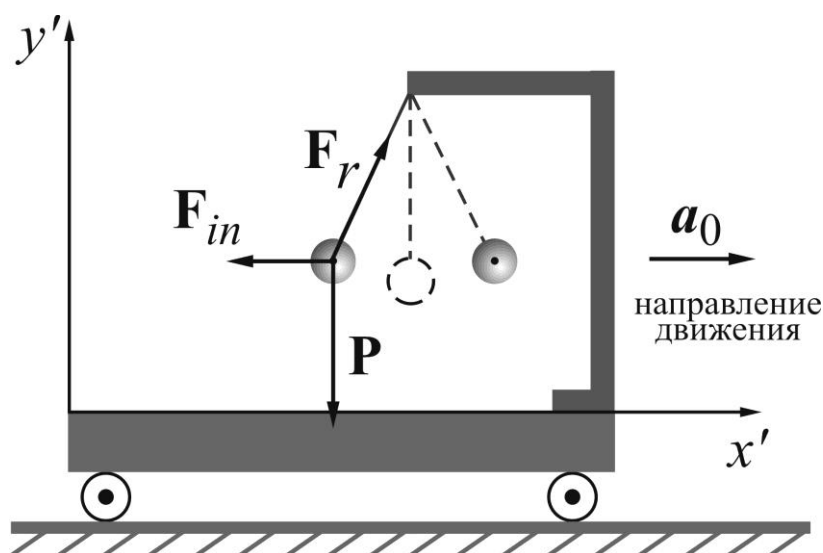


Рис 1.20. Иллюстрация возникновения силы инерции при ускоренном прямолинейном движении тележки по горизонтальной поверхности ($\mathbf{P}$ – сила тяжести; $\mathbf{F}_r$ – реакция нити; $\mathbf{a}_0$ – ускорение; $\mathbf{F}_{in}$ – сила инерции). При резком торможении (ускорение равно $-\mathbf{a}_0$) тело отклоняется вправо

Эта ситуация хорошо знакома каждому, кто находился в движущемся транспорте при его внезапной остановке или при быстром наборе скорости.

2. Система координат (например, связанная с горизонтально расположенным диском) вращается с постоянной угловой скоростью ω , относительно вертикальной оси, как показано на рис. 1.21.

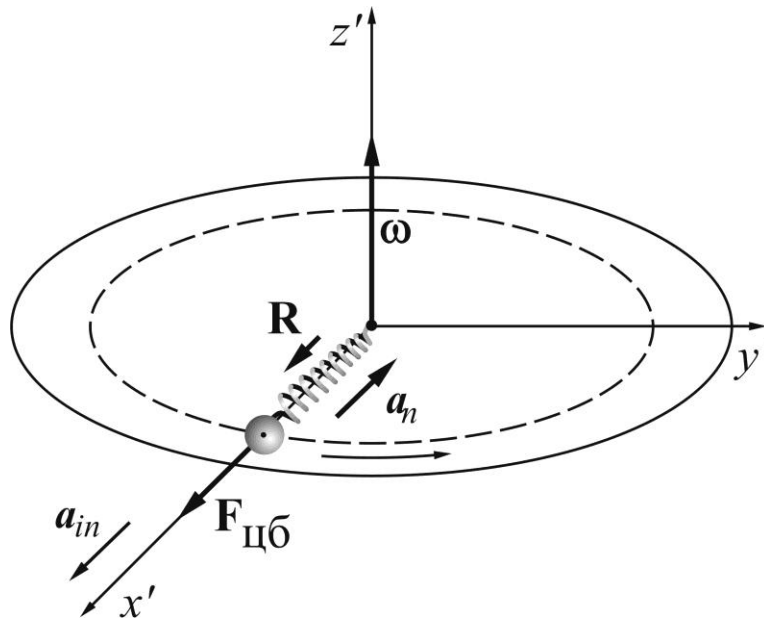


Рис. 1.21. Центробежные силы инерции во вращающейся системе отсчета

Тело (например, шарик) массы m посредством пружины закреплен в центре вращающейся системы отсчета и может скользить без трения по спице, проходящей через центр шарика. Вектор $\mathbf{R}$ отсчитывается от центра вращения. Для внешнего наблюдателя все легко объяснимо: тело вращается на круговой орбите с центростремительным ускорением

$$\mathbf{a}_n = -\omega^2 \mathbf{R}. \quad (1.25)$$

Удерживается оно на этой траектории силой упругости растянутой пружины $\mathbf{F}_{упр.}$

$$\mathbf{F}_{упр.} = -\omega^2 \mathbf{R} m, \quad (1.26)$$

Для наблюдателя, расположенного в системе k' , растянутое состояние пружины легко объяснимо, если он физически ощущает вращение диска (например, находясь в кресле вращающейся карусели).

Такое положение тела (шарика) описывается введением центробежной силы инерции:

$$\mathbf{F}_{in} = \mathbf{F}_{цб} = m\omega^2 \mathbf{R}. \quad (1.27)$$

Эту силу необходимо учитывать всегда во вращающейся системе координат, движется ли тело относительно нее или нет. Наглядной иллюстрацией является простейший эксперимент. На вращающийся диск устанавливают отвес на разном удалении от центра вращения $\mathbf{R}$ (рис. 1.22). Наклонному положению отвеса в неинерциальной системе соответствует уравнение $\mathbf{F}_r + m\mathbf{g} + \mathbf{F}_{in} = 0$, угол наклона определяет величина $\mathbf{F}_{in}$, зависящая от массы отвеса, угловой скорости вращения диска и расстояния $\mathbf{R}$.

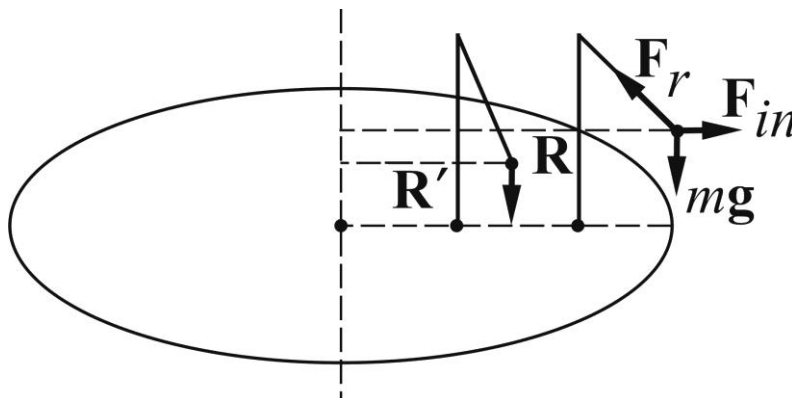


Рис. 1.22. Центробежные силы инерции, действующие на отвес на вращающемся диске. Чем дальше место расположения отвеса, тем больше центробежная сила инерции

При перемещении тела во вращающейся системе координат возникает так называемая сила инерции Кориолиса. В масштабах Земли ее влияние на движение тел весьма значительно. Проявляется это, например, в подмывании правого берега рек в северном полушарии или левого берега рек, в южном полушарии, смещении воздушных масс, приливах и отливах и т.д. Но на человека, перемещающегося с обыч-

ной скоростью 5-6 км в час, никакого влияния она не оказывает. При нахождении в быстро движущемся транспортном средстве выделить влияние сил Кориолиса от действия других сил не представляется возможным. По этой причине мы опустим рассмотрение этой разновидности сил инерции.

Все многообразие физических явлений описывается в рамках четырех видов фундаментальных взаимодействий: гравитационного, электромагнитного (электрические и магнитные взаимодействия являются частными случаями электромагнитного взаимодействия), сильного и слабого. При описании механических явлений используют три вида сил: силы классического гравитационного взаимодействия, силы трения и силы упругости.

1.2.4. Гравитационное взаимодействие. Сила тяжести и вес

Гравитационное взаимодействие двух материальных точек m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга, описывается так называемым законом всемирного тяготения [И. Ньютон, 1686 г.] (рис. 1.23а), который в скалярном виде представлен как

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.28)$$

где γ – гравитационная постоянная ($\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$).

Для тела массой m , находящегося на высоте h над поверхностью Земли (рис. 1.23 б), это взаимодействие запишется в виде:

$$F = \gamma m \frac{M}{(R+h)^2}, \quad (1.29)$$

где M и m – масса Земли и тела, соответственно, R – радиус земного шара (примерно равен 6400 км).

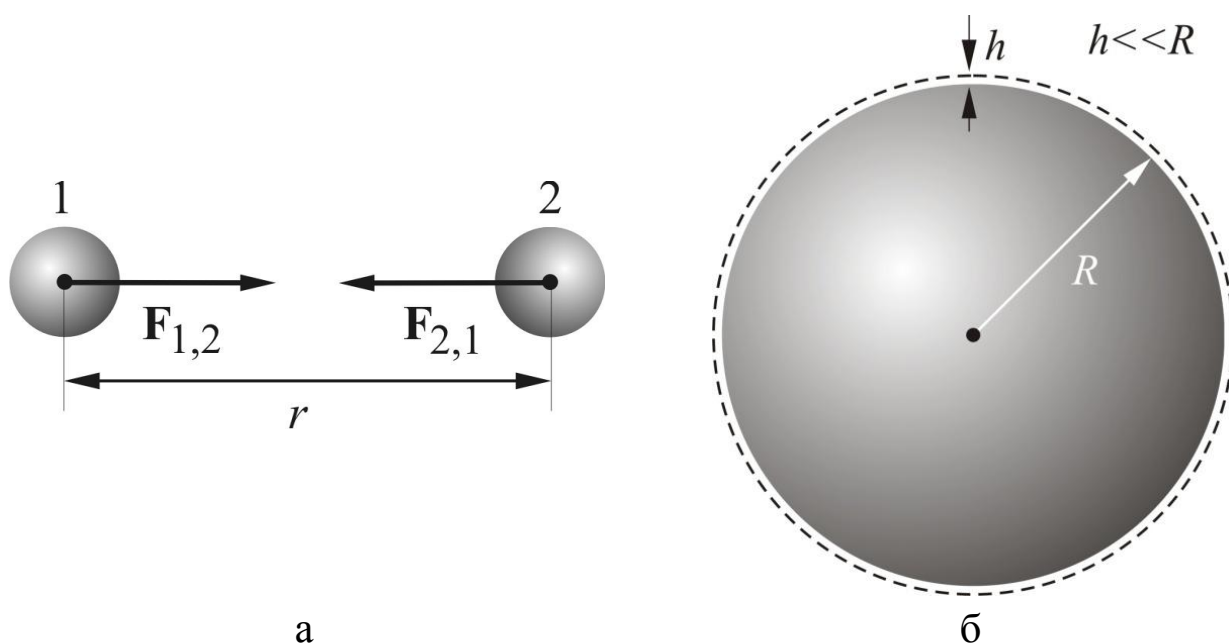


Рис. 1.23. а) – силы гравитационного взаимодействия двух материальных точек; б) – иллюстрация гравитационного взаимодействия Земли и тела, находящегося на высоте h над поверхностью Земли

Примем, что среда обитания животного мира простирается до 10 км (высотный потолок принадлежит гусям: во время перелета они поднимаются на высоты около 9.5 км). Нетрудно подсчитать, что различия в величинах земного тяготения вблизи поверхности Земли и на высоте $h=10$ км будут малы (приблизительно 3%). Согласно второму закону Ньютона $\mathbf{a}m=\mathbf{F}$. Поскольку сила земного тяготения практически неизменна, то и ускорение, под действием которой тела падают на землю, можно принять постоянным. Это ускорение называют ускорением свободного падения и обозначают $\mathbf{g}^*$, а силу гравитационного взаимо-

* Ускорение свободного падения g на поверхности Земли варьируется от 9,780 м/с² на экваторе до 9,832 м/с² на полюсах. Это различие обусловлено наличием центробежных сил инерции вследствие суточного вращения Земли. Стандартное значение, принятое при построении систем единиц, составляет $g = 9,80665$ м/с². Оно было определено как «среднее» по значениям в различных точках на поверхности Земли. Примерно равно ускорению свободного падения на широте 45,5° на уровне моря. Высотное различие таково: на уровне моря g равно 9,80066 м/с², а на высоте 10 км – 9,7759 м/с². В приближенных расчётах величину ускорения свободного падения g принимают равной 9,81; 9,8 или 10 м/с².

действия называют силой тяжести и обозначают $\mathbf{F}_g$. Теперь уравнение движения падающего тела запишется в виде:

$$m\mathbf{g} = \mathbf{F}_g. \quad (1.30)$$

Вес тела $\mathbf{P}$ – это сила, с которой тело (например, шар на рис. 1.24) действует на горизонтальную опору (выделено серым фоном) или подвес.

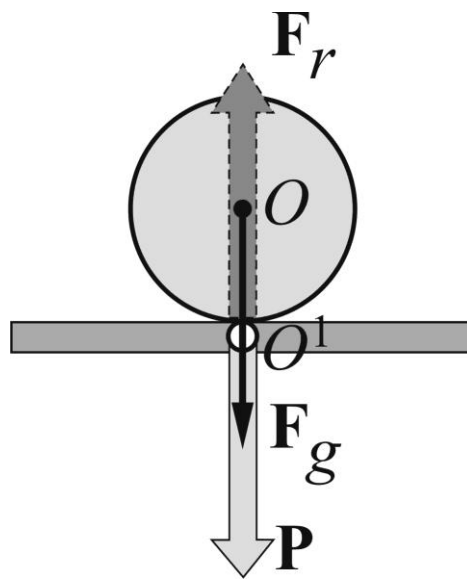


Рис. 1.24. Направления и точки приложения сил в системе тело–опора, находящейся в поле земного тяготения

Сила реакции опоры $\mathbf{F}_r$, (обозначена темно-серой стрелкой, окаймленной пунктиром и направленной вверх), т.е. сила, с которой опора действует на тело, по третьему закону Ньютона равна по модулю, но противоположна по направлению вектору веса тела:

$$\mathbf{P} = -\mathbf{F}_r. \quad (1.31)$$

Если тело находится в покое на горизонтальной поверхности, т.е. на него действуют только сила тяжести $\mathbf{F}_g$, (обозначена стрелкой, приложенной к центру массы тела – точке O) и сила реакции $\mathbf{F}_r$, со стороны опоры, то из равенства:

$$\mathbf{F}_g = -\mathbf{F}_r, \quad (1.32)$$

следует, что

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{P}, \quad (1.33)$$

Таким образом, вес $\mathbf{P}$ тела равен силе тяжести $\mathbf{F}_g$, но приложены эти силы к разным телам. Вектор, обозначающий вес тела, приложен к точке опоры* (O^1), а вектор силы тяжести, как уже отмечалось, приложен к центру массы тела (точка O), лежащего на опоре. Сила упругой реакции опоры $\mathbf{F}_r$ не имеет фиксированной точки приложения к телу.

По второму закону Ньютона ($\mathbf{a}m = \mathbf{F}$) вертикальное движение тел описывается уравнением

$$\mathbf{a}m = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_r, \quad (1.34)$$

где m – масса тела, $\mathbf{a}$ – ускорение, с которым движется опора. Из уравнений (1.31) и (1.34) для веса $\mathbf{P}$ получаем:

$$\mathbf{P} = \mathbf{F}_g - m\mathbf{a} = m\mathbf{g} - m\mathbf{a} = m(\mathbf{g} - \mathbf{a}). \quad (1.35)$$

* Точка опоры – модельное понятие. В действительности – это поверхность соприкосновения.

1.2.5. Невесомость и перегрузка

Рассмотрим случай ускоренного движения лифта (рис. 1.25а), когда ускорение $\mathbf{a}$ направлено вертикально вниз. Такая физическая ситуация возникает, например, в том случае, если трос, удерживающий лифт, оборвался, но сработало тормозное устройство, не позволяющее лифту падать в шахте с ускорением свободного падения. Сила тяжести, направленная вертикально вниз, оказывается частично скомпенсированной силой трения тормозного устройства. Очевидно, в этом случае ускорение, с которым будет падать система «лифт-тело», будет определяться разностью силы тяжести и силы трения, создаваемой тормозным устройством.

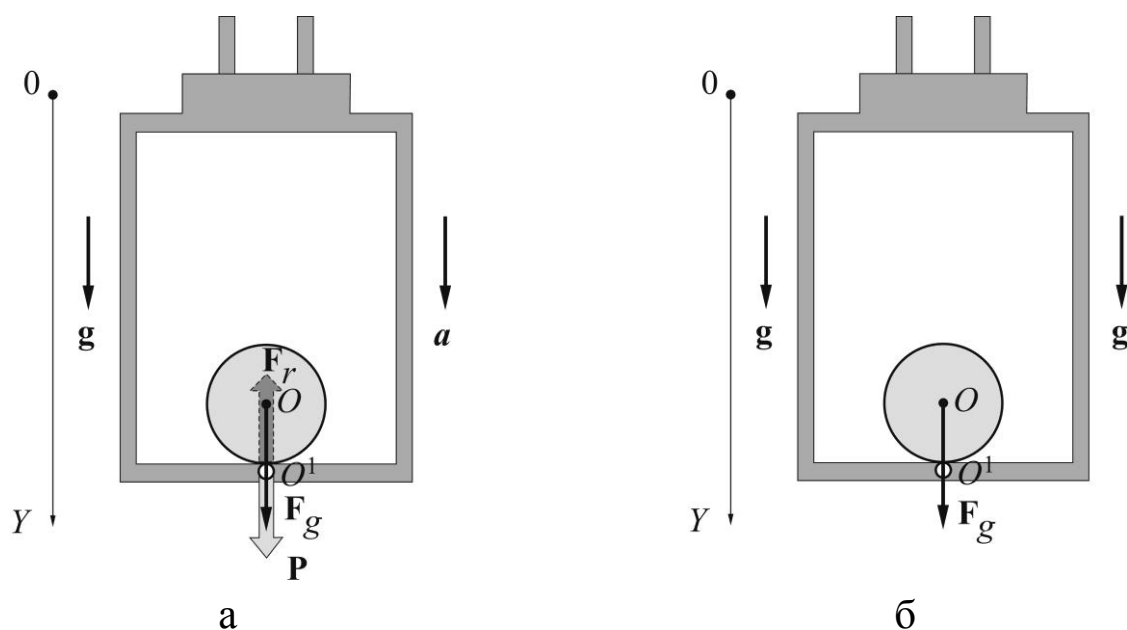


Рис. 1.25. Движение лифта вниз: а) – с ускорением $\mathbf{a}$, б) – с ускорением $\mathbf{g}$ (состояние невесомости тела и лифта)

Таким образом, при движении лифта с ускорением вес тела, находящегося в лифте, будет отличаться от веса, измеренного в неподвижном относительно Земли лифте. Действительно, если координатную ось OY направить вертикально вниз, то векторы $\mathbf{P}$, $\mathbf{g}$ и $\mathbf{a}$ парал-

лельны оси OY , а их проекции положительные. Тогда уравнение 1.35 примет вид:

$$P_y = m(g_y - a_y) \quad (1.36)$$

или в скалярной форме:

$$P = m(g - a). \quad (1.37)$$

Из уравнения (1.37) следует, что вес тела, направление ускорения которого совпадает с направлением ускорения свободного падения, меньше веса покоящегося тела. Именно этот случай показан на рисунке 1.25а, где внутри лифта размещено тело. Из этого же выражения хорошо видно, что если тело и лифт движутся вниз с одинаковым ускорением, равным ускорению свободного падения, то сила упругой реакции опоры (лифта) на тело отсутствует (рис. 1.25б). Такая ситуация может возникнуть, когда трос, на котором подвешен лифт, обрывается, а тормозное устройство не срабатывает. Итак, если тело вместе с опорой свободно падает, то $a = g$, и из формулы (1.37) следует, что $P = 0$. Исчезновение веса при движении опоры с ускорением свободного падения под действием силы тяжести F_g называется невесомостью.

За пределами земной атмосферы при выключении реактивных двигателей (т.е. когда сила тяги двигателей равна нулю) на космический корабль действует только сила гравитационного взаимодействия. Под действием этой силы космический корабль и все тела, находящиеся в нем, движутся с одинаковым ускорением, поэтому на корабле наблюдается явление невесомости.

При движении тела и опоры с ускорением a , направленным вертикально вверх (рис. 1.26), вес тела оказывается больше действующей на него силы тяжести. Такая ситуация возникает при движении лифта вертикально вверх в течение короткого времени после включения, по-

ка скорость намотки троса, удерживающего лифт, увеличивается во времени, например, по линейному закону ($v = v_0 + at$). После набора определенной скорости лифт движется равномерно до начала торможения перед следующей остановкой. В этой ситуации сила, приводящая к ускоренному движению лифта вверх, передается через трос к лифту. В результате происходит увеличение результирующей силы упругой реакции опоры на величину этой силы. Обе эти силы направлены вертикально вверх, и увеличение результирующей силы приводит к росту веса тела (в скоростных лифтах это явно ощущается как подгибание ног в момент начала подъема лифта).

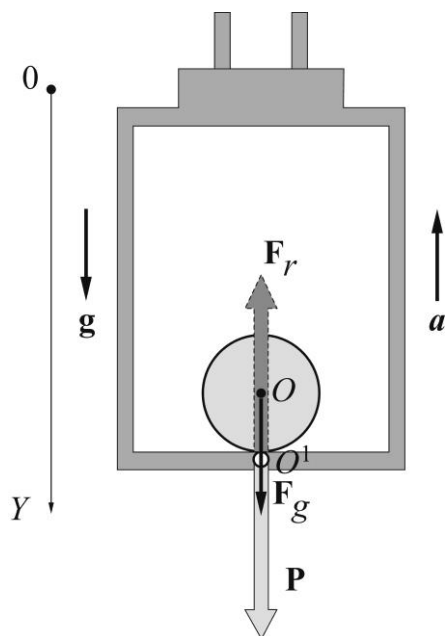


Рис. 1.26. Движение лифта вверх с ускорением a

Итак, в этом случае проекции P_y и g_y положительны, а проекция a_y отрицательна (при выбранном направлении оси OY , см. рисунок 1.26). Поэтому для модуля веса получаем выражение

$$P = m(g + a). \quad (1.38)$$

Увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса, называется *перегрузкой*.

Единицы измерения.

Введем единицы измерения физических величин. Основные единицы – это совокупность независимых единиц измерения физических величин. Производные единицы – единицы измерения физических величин, связанных между собой определенными закономерностями (формулами) с использованием основных единиц.

Как правило, используют две системы единиц: СИ – Международную систему единиц и СГС (сантиметр-грамм-секунда). Но, следуя сложившимся традициям, привлекают и внесистемные единицы измерения.

Основные единицы:

	СИ	СГС
длины, l, L	м	см
массы, m, M	кг	г
времени, t, T	с	с

Производные единицы:

	СИ	СГС
скорости v	м/с	см/с
ускорения a	м/с ²	см/с ²
силы f, F	Н (Ньютон) кг·м/с ² ; кг·м·с ⁻²	дин (дина) г·см/с ² ; г·см·с ⁻²
	1Н = 10 ⁵ дин	

В технике – это система единиц МКГСС, в которой за основные приняты: единица длины – метр (м), единица силы – килограмм-сила (кгс, кг), единица времени – секунда (с). Килограмм-сила определяется как сила, сообщающая массе 1 кг ускорение, равное ускорению свободного падения g . Из этого определения следует, что 1 кгс = 9,81 Н. Именно эту единицу силы используют в повседневной практике, например, для определения веса. Для образования производных единиц пользуются т.н. правилами размерности [1в], некоторые из них будут приведены, по мере необходимости, в следующих разделах курса.

Очевидно, изменение основных единиц влечёт за собой изменение производных единиц. Для их построения пользуются формулой размерности – соотношением, определяющим связь между основными единицами измерения $A_1 A_2 \dots$ и производной A :

$$[A] = [A_1]^\alpha [A_2]^\beta [A_3]^\gamma \dots [A_i]^\tau.$$

Здесь A – буквенное обозначение единицы измерения (символы $\alpha, \beta, \dots$ означают любое число, в том числе дробное, $2^{1/2} = \sqrt{2}$), $[A]$ – её размерность. В механике единица измерения времени t соответствует $[t] = T$, длины l – $[l] = L$, массы m – $[m] = M$.

Например, для силы:

$$F = ma \Rightarrow [F] = [m][a] = [m][v][t]^{-1} = [m][l][t]^{-1}[t]^{-1} = [m][l][t]^{-2} = MLT^{-2} \Rightarrow 1 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2} (1\text{Н}) \text{ или } 1 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2} = 1 \text{ дин}.$$

Кажущаяся на первый взгляд громоздкой, формула размерности избавляет от ошибок при проведении расчётов, выводов формул и т.п. Если все расчёты сделаны правильно, то размерности величин в левой и правой части полученного соотношения должны совпадать.

1.2.6. Физиологические аспекты воздействия невесомости и перегрузки на человека

Пропорции и размеры человеческого тела, сила мышц и прочность костей приспособлены к существованию в условиях нахождения в гравитационном поле Земли. Поэтому, если человек оказывается в ситуации, когда сила тяжести значительно превышает силу земного притяжения, или, наоборот, пребывает в состоянии невесомости или близком к нему, он испытывает затруднения в выполнении самых обычных движений.

1.2.6.1. Невесомость

Работа человека в условиях невесомости, т.е. когда движение тела совершается под воздействием одной единственной силы – силы гравитационного взаимодействия – требует специальных навыков, а длительное пребывание в состоянии невесомости отрицательно сказывается на физическом состоянии человека и животных. К основным факторам относят:

- нарушение мозгового кровообращения, прилив крови к голове;
- уменьшение объема циркулирующей в сердечно-сосудистой системе крови;
- атрофия определенных групп мышц, ответственных за противодействие силе тяжести;
- уменьшение содержания кальция в костной ткани и т.д.*

Для работы в условиях невесомости и пониженной силы тяжести (например, на Луне сила тяжести меньше в 6 раз) необходимо понимать суть этих явлений и, конечно, уметь правильно двигаться. Знания о двигательной активности человека в этих условиях накапливаются в ходе специальных медико-биологических экспериментов, широко использующих биомеханические методы.

Подобные эксперименты показали, например, что при пониженном тяготении темп и энергетические затраты локомоторных (*locomotivo* (латинское) – *сдвигаю с места*) движений человека снижаются; локомоции и состояние человека характеризуются увеличенной амплитудой сгибания крупных суставов; изменяется способ передвижения – не шагами, а прыжками. Кратковременное состояние невесомости в земных условиях можно создать в самолете, движущемся по специальной траектории. Это обстоятельство используют при подготовке

* Однако необходимо отметить, что влияние невесомости на физическое состояние человека и животных с выделением конкретных факторов весьма условно. Оно складывается из факторов стресса и влияния перегрузок в полёте до перехода в состояние невесомости и влияния собственно невесомости. Эти вопросы относятся к разделу космической медицины «Гравитационная патофизиология».

космонавтов. Кроме того, для имитации пониженного тяготения разработаны специальные стенды. С помощью методов биомеханики разрабатываются также средства, облегчающие движения человека в необычных условиях.

При выполнении стандартных упражнений или действий у человека, находящегося в гравитационном поле, вырабатываются определенные стереотипы движений, обеспечивающие бессознательное достижение требуемого результата. При этом человек обязательно взаимодействует с опорой, к которой его прижимает сила тяжести. В невесомости исчезает привычное взаимодействие с опорой. Поэтому стандартное выполнение упражнений или действий приводит к появлению существенных побочных эффектов. Так, человек, бросивший предмет, начинает двигаться в противоположном направлении согласно закону сохранения импульса.

До броска предмета массой m_1 человеком (массой m_2) импульс системы был равен 0 и их импульсы также равны 0 (человек и предмет неподвижны, т.е. суммарный импульс $\mathbf{p}=0$). Неизменным он должен оставаться и после броска предмета со скоростью $\mathbf{v}_1$. Следовательно, человек начнет перемещаться с некоторой скоростью $\mathbf{v}_2$ в противоположном направлении, согласно условию $\mathbf{p} = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = 0$.

Поэтому если прыгнуть в воду с носа или кормы лодки, то лодка двинется в противоположную сторону.*

Как было показано выше, естественные на Земле физические нагрузки на организм человека в космосе отсутствуют. Поэтому при длительном пребывании в состоянии невесомости возникает остеодистрофия – дистрофия костной ткани. Обусловлена она нарушением внутритканевого обмена веществ, преимущественно фосфор-кальциевого. Она характеризуется перестройкой костной структуры с заменой костных элементов остеонидной и фиброзной тканями. В ре-

* Это только качественное сравнение, поскольку в этом случае система не замкнутая – существуют силы трения. Прыгать с борта лодки не рекомендуется: лодка может опрокинуться, либо зачерпнуть бортом воду.

зультате снижается резистентность (сопротивляемость) костно-опорного аппарата человека действию ударных нагрузок. Основным следствием изменения биомеханических свойств костной ткани, в первую очередь, является экссудативное воспаление эпидермиса, при котором серозная жидкость скапливается в межклеточном пространстве, вследствие чего увеличиваются межклеточные лакуны, что и приводит к снижению ее минеральной плотности или насыщенности. С уменьшением минеральной плотности снижаются предел прочности и модуль упругости. В условиях невесомости проявляются, в основном, отрицательный баланс кальция и снижение минеральной плотности костной ткани некоторых элементов скелета. Однако по высоте скелета минеральная плотность изменяется неодинаково. Начиная с уровня поясничных позвонков и ниже, минеральная плотность костной ткани снижается. Время восстановления минеральной плотности поясничных позвонков после полета может в 2–3 раза превышать длительность полета. Этот факт позволяет спланировать режим послеполетной реабилитации космонавтов.

Установлено, что условия невесомости с точки зрения минерализации можно моделировать. Оказалось, что потери кальция в условиях космического полета соответствуют потерям, которые наблюдаются при длительном постельном режиме. Дело в том, что в горизонтальном положении нагрузки на позвоночник минимальные, что отрицательно отражается на всех функциях организма, проявлением чего и является потеря кальция. *Это позволяет рассматривать постельный режим как адекватную невесомости модель применительно к костной системе.*

Неблагоприятное влияние реальной и моделируемой постельным режимом невесомости на механические характеристики костей подтверждено экспериментами с крысами на биоспутниках и опыта-

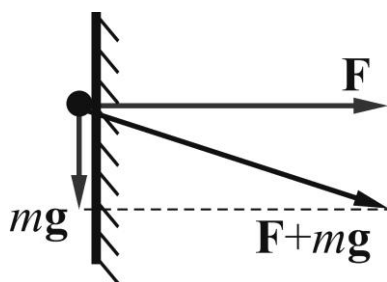
ми с биоптатами* костной ткани, взятыми у добровольцев после длительной гипокинезии (ограниченного движения).

В качестве средства профилактики костной атрофии можно применять искусственную нагрузку, которая обеспечит уровень напряжений в скелете, соответствующий земным гравитационным нагрузкам. Или, например, достаточно продолжительное, порядка одного часа спокойное стояние пациента (при постельном режиме в остальное время) предотвращает отрицательный кальциевый баланс. Разумеется, этому способствуют регулярные занятия физическими упражнениями.

Длительное пребывание в условиях невесомости приводит к недозагрузке мышц и опорно-двигательного аппарата человека. Поэтому космонавты должны выполнять специальные физические упражнения, носить особые костюмы, затрудняющие движения, и т.п. Однако, как показывает накопленный опыт, всего этого недостаточно. Кардинальное решение проблемы может быть достигнуто только созданием искусственной силы тяжести.

1.2.6.2. Перегрузки

Действие перегрузки испытывают, например, космонавты как при взлете космической ракеты (если космический корабль стартует с ускорением $4g$, то вес тела в корабле равен $5mg$, т.е. космонавт ощущает пятикратную перегрузку), так и на участке торможения космического корабля при входе в плотные слои атмосферы.



Торможение происходит как вследствие действия тормозных двигателей, так и сил трения, возникающих при движении корабля с большим отрицательным ускорением (замедлением) в атмосфере. Такая же ситуация имеет место, например, при разгоне или торможении автомобиля. Запишем второй закон Ньютона в диффе-

* Биопсия — метод исследования, при котором проводится прижизненный забор клеток или тканей (биоптата) из организма с диагностической или исследовательской целью.

ренциальном виде, чтобы оценить, как зависит величина кратковременной перегрузки от времени торможения (разгона): $\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$. Покоящееся или равномерно прямолинейно горизонтально движущееся тело имеет вес $m\mathbf{g}$. Тогда величина горизонтальной составляющей перегрузки в относительных величинах равна $\frac{F}{mg} = \frac{m}{mg} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{g} \frac{dv}{dt}$. (В общем случае, направление и величина перегрузки определяются направлением и модулем суммарного вектора $\mathbf{F} + m\mathbf{g}$; вертикальная составляющая, обусловленная весом тела $m\mathbf{g}$, приводит к смещению тела вдоль поверхности препятствия).

Таким образом, величина кратковременной перегрузки – это отношение возникающего при торможении ускорения к ускорению свободного падения, и она тем значительнее, чем короче время торможения (разгона). Но измеряется она в единицах g (за норму принимается величина ускорения свободного падения g в поле земного тяготения: n – кратная перегрузка означает, что перегрузка равна ng). При резком, мгновенном торможении – это удар с разрушительным воздействием даже при небольшой скорости движения. *Вспомните случаи из жизни: зачастую стеклянная банка даже при незначительном ударе о бетонный пол разбивается, что редко случается при соприкосновении с полом, покрытом относительно мягким материалом, например, линолеумом. В первом случае время взаимодействия банки и жесткого пола (время амортизации) очень мало и перегрузка трансформируется в удар.* Ремни и подушки безопасности, амортизирующие бамперы автомобиля призваны увеличить время взаимодействия тела водителя и возникшего на пути его движения препятствия. (См. статьи в интернете по ключевым словам – «краш-тест»). Не следует путать с термином «краш-синдром» или «синдромом длительного давления». Такое состояние возникает, когда человек на длительное время придавлен тяжелым предметом, например в завалах. Отметим только, что пределом

выносливости перегрузок (пределом допустимой переносимости) для человека является 50–60 *g*. Пределом выносливости для незащищённого тела является величина кинетической энергии (см. раздел 1.5.1.2), воспринимаемая непосредственно перемещающимся в транспортном средстве телом, соответствующая внезапной остановке его при скорости движения тела около 15 км/ч. При 50 км/ч энергия превышает допустимую величину примерно в 10 раз. Следовательно, задача состоит в снижении ускорения тела человека до столкновения с препятствием и после того, как оно произошло, за счёт продолжительных деформаций передней части кузова автомобиля, деформации подушек безопасности* и т.п.

При отсутствии средств активной безопасности уже при скорости 50 км/ч пассажиры, сидящие на разных местах салона автомобиля, испытывали бы перегрузки от 90 *g* до 200 *g*. При их использовании – в пределах 5–10 *g*.

Перегрузки испытывает летчик, выводящий самолет из пикирования (рис. 1.27).

* При авариях в ходе автомобильных гонок нередко датчики сбора данных регистрируют перегрузки порядка 80*g*. Рекордная перегрузка зафиксирована во время Сильверстоунских гонок в Великобритании (1977) – около 180*g*. Датчики зарегистрировали 6 остановок сердца пилота. В результате аварии у него произошло 29 переломов и три вывиха.

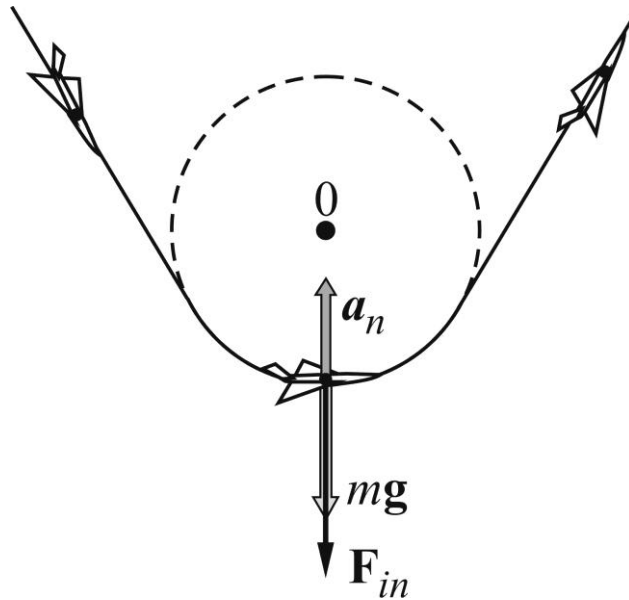


Рис. 1.27. Перегрузки, возникающие при выводе самолета из пикирования

Мгновенное численное значение центростремительного ускорения при движении материальной точки по криволинейной траектории равно (см. уравнение 1.5)

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.39)$$

где R – радиус кривизны и v – линейная скорость, соответственно, в данный момент времени (здесь в нижней точке траектории). Самолет можно принять за вращающуюся неинерциальную систему координат, модуль мгновенного значения центростремительного ускорения которого равен вышеприведенной величине, а направление представлено на рис. 1.27. Тело пилота покоится относительно самолета (сиденья), стало быть, оно давит на сиденье с силой F , равной сумме силы тяжести mg и центробежной силы инерции F_{in} (приводятся абсолютные значения – модули векторов сил):

$$P = mg + \frac{mv^2}{R}. \quad (1.40)$$

Согласно 3-му закону Ньютона такое же воздействие оказывает сиденье на пилота.

Для подготовки человека к работе в условиях значительной перегрузки необходимы специальные тренировки. Для этого используют центрифугу, которая представляет собой кабину, вращающуюся в горизонтальной плоскости на длинной штанге (рис. 1.28). (Другое применение центрифуги – разделение неоднородных систем (компонентов различной массы, например, компонентов крови) в поле центробежных сил – в т.н. центробежном поле).

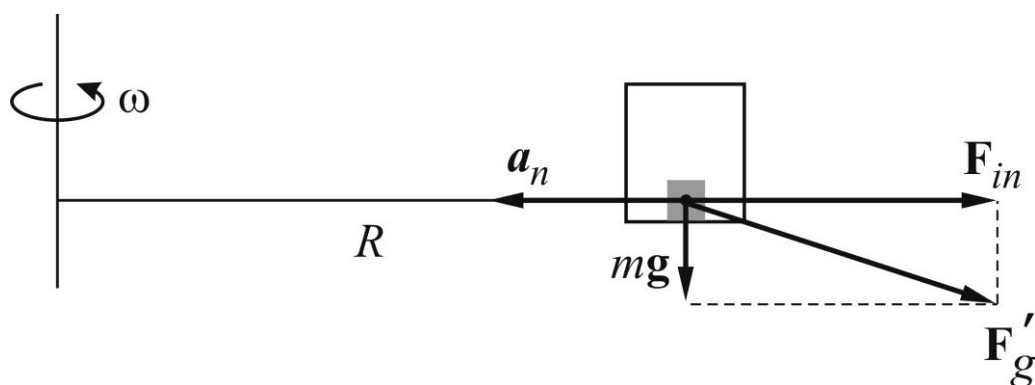


Рис.1.28. Принцип создания перегрузок на центрифуге

Обозначим через R суммарное расстояние (длина штанги центрифуги + расстояние центра тяжести тела до края кабины). Если кабина (следовательно, и тело) вращается с угловой скоростью ω , то модуль центростремительного ускорения a_n равен

$$a_n = \omega^2 R \quad (1.41)$$

и на тело внутри кабины, являющейся неинерциальной системой координат (см. раздел.1.2.3), действует *центробежная сила инерции* $\mathbf{F}_{in}$:

$$\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}_n, \quad \mathbf{F}_{in} = m\omega^2 R. \quad (1.42)$$

Сила $\mathbf{F}_g'$, действующая на тело, определяется векторной суммой силы инерции $\mathbf{F}_{in}$ и силы тяжести вблизи поверхности Земли $m\mathbf{g}$:

$$\mathbf{F}_g' = \mathbf{F}_{in} + m\mathbf{g}. \quad (1.43)$$

Модуль F_g' равен

$$F_g' = \sqrt{F_{in}^2 + (mg)^2} = \sqrt{(mg)^2 + (m\omega^2 R)^2} = m\sqrt{g^2 + \omega^4 R^2}. \quad (1.44)$$

Величина перегрузки определяется отношением:

$$\frac{F_g'}{mg} = \sqrt{1 + \frac{\omega^4 R^2}{g^2}}. \quad (1.45)$$

Таким способом, изменяя угловую скорость вращения, можно задать необходимую перегрузку. В табл. 1.1 представлены значения перегрузок, возникающих в некоторых условиях, а в табл. 1.2 – значения кратковременных перегрузок, переносимых человеком.

Для того, чтобы человек мог переносить значительные перегрузки, применяются специальные устройства: катапультные и амортизационные кресла, привязные системы, защитные шлемы и др.

Таблица 1.1

Значения перегрузок (в ед. g), возникающих при различных условиях

Условия перегрузки	Значения перегрузок
Перегрузка неподвижно стоящего человека	1
Пассажир при взлете самолета	до 1,5
Парашютист во время раскрытия парашюта при скорости падения 30 м/с	1,8
Парашютист во время раскрытия парашюта при скорости падения 40 м/с	3,3
Парашютист во время раскрытия парашюта при скорости падения 50 м/с	5,2
Летчик в момент катапультирования из самолета	до 16
Перегрузки при спуске космического корабля «Восток»	до 8–10
Перегрузки при спуске космического корабля «Союз»	до 3–4

Таблица 1.2

Кратковременные перегрузки (в ед. g), относительно безболезненно переносимые тренированным человеком

Направление локальной силы тяжести	Величина перегрузок
в направлении «спина-грудь» и «грудь-спина»	до 30
в направлении «голова-ноги»	до 20
в направлении «ноги-голова»	до 8

Величины перегрузок могут колебаться в пределах допустимой переносимости, но они во всех случаях не должны нарушать кровоснабжения мозга. Как показали многочисленные исследования, ускорение в направлении «голова-ноги» вызывает отток крови от головы и приводит к заметным нарушениям деятельности мозга. Ускорение в направлении «грудь-спина» переносится человеком гораздо легче,

кровообращение мозга если и нарушается, то в заметно меньших пределах.

При перегрузках нарушается координация произвольных движений. При этом пределы нарушений зависят от состояния вестибулярного аппарата человека и тренированности (общей и в условиях перегрузок) лица, оказавшегося в этих условиях. В подразделах 1.2.4–1.2.6 использованы данные, содержащиеся в [3а, 3б].

1.3. Деформации и упругие силы. Механические свойства живых тканей

1.3.1. Деформации и упругие силы

При механическом воздействии тела деформируются, т.е. изменяют свою форму и размер. Различают несколько видов деформации: растяжение (сжатие), сдвиг, кручение и изгиб. Основные соотношения, описывающие деформации, можно проиллюстрировать на примере деформации растяжения (рис 1.29).

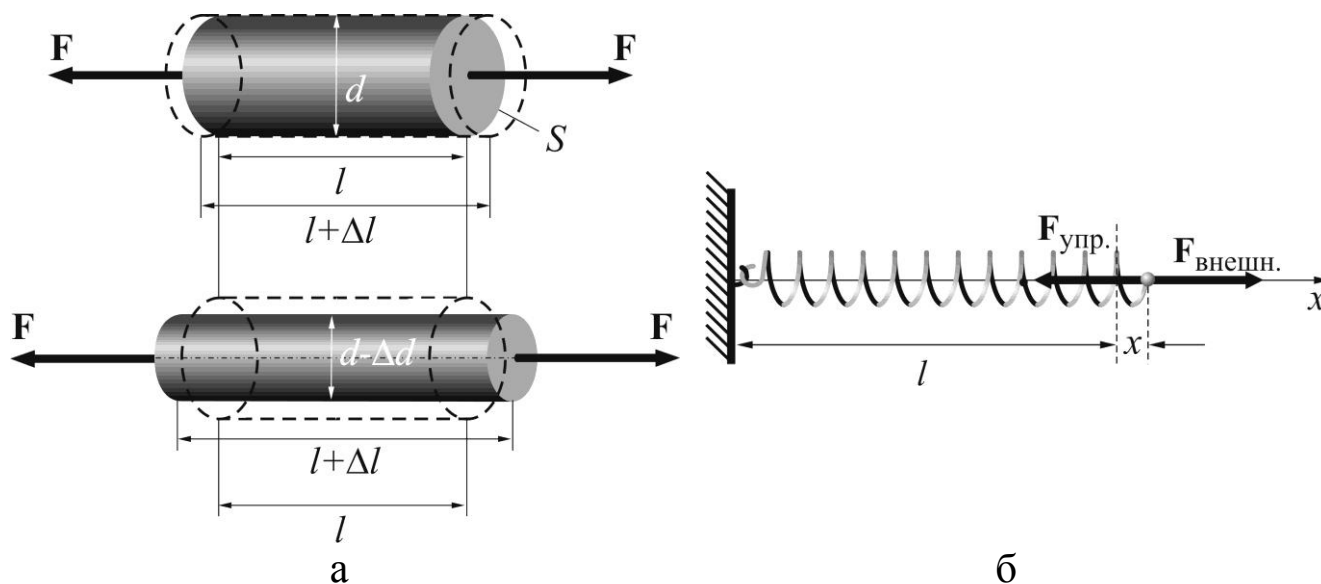


Рис. 1.29. Схематическое представление деформации растяжения тела: а) — вверху — гипотетическая деформация без изменения поперечного сечения, внизу — с изменением поперечного сечения; б) — деформация растяжения упругой пружины

Согласно закону Гука*, удлинение стержня Δl прямо пропорционального силе внешнего воздействия. Обычно закон Гука записывается в виде $F_{\text{внеш.}} = k\Delta l$, или:

$$F_{\text{внеш.}} = kx, \quad (1.46)$$

где $x (= \Delta l)$ – удлинение вдоль условной координаты x , k – коэффициент жёсткости (упругости), рис. 1.29б.

При внешнем воздействии, очевидно, в теле возникает т.н. упругая сила $F_{\text{упр.}}$, численно равная силе внешнего воздействия $F_{\text{внеш.}}$, но направленная в противоположную сторону, т.е. $F_{\text{упр.}} = -kx$ в соответствии с рис. 1.29б.

В качестве меры воздействия принимается сила, действующая на единицу поперечного сечения стержня (тела) σ , называемая *напряжением* (иногда *поверхностной силой*, или *поверхностной нагрузкой*):

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (1.47)$$

В качестве меры деформации используется относительное удлинение $\varepsilon = \Delta l/l$. Здесь l – начальная длина стержня, Δl – удлинение. С учетом введённых обозначений уравнение (1.46) преобразуется в уравнение:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E\varepsilon, \quad (1.48)$$

где E – модуль упругости растяжения (сжатия) – модуль Юнга. Величина E зависит от свойств материала. Относительное растяжение (сжатие) стержня сопровождается, как показано на рис 1.29а (нижний), его

* Роберт Гук (англ. Robert Hooke; 18 (28) июля 1635–3 марта 1703) – английский естествоиспытатель и изобретатель. Член Лондонского королевского общества (1663). Гука называют одним из отцов экспериментальной физики, во многих разделах науки ему принадлежат одни из первых основополагающих работ и множество открытий.

поперечным сужением $d - \Delta d$ (расширением $d + \Delta d$), относительной мерой которого является величина $\Delta d/d$. Эти две характеристики деформации связаны соотношением, называемым коэффициентом Пуассона, $\mu^* = \left| \frac{\Delta d}{d} \right| / \left| \frac{\Delta l}{l} \right|$.

На рис. 1.30 изображена типичная кривая деформации растяжения твердого тела, описывающая зависимость напряжения σ от относительного удлинения ε . На ней выделены характерные области: область ОП – область пропорциональности, где удлинение возрастает пропорционально напряжению и далее до точки «У» несколько быстрее. Точка «У» называется пределом упругости: при дальнейшем увеличении напряжения появляются первые признаки остаточной деформации, т.е. деформации, остающейся в теле после снятия напряжения. В области ОУ и выполняется закон Гука. Область УТ – область пластической деформации. На горизонтальном участке ТТ' деформация нарастает без увеличения напряжения (область текучести) и далее точка разрыва (разрушения) «Р» – предел прочности.

1.3.2. Механические свойства живых тканей

Механические свойства живых тканей и органов определяют их реакции на механические воздействия. При механическом воздействии живые ткани, как и любое реальное тело, деформируются.

Применительно к тканям живых органов рассматривают только области упругой и остаточной деформации.

* Он равен отношению модулей (численных величин) относительного поперечного сужения (сжатия) к удлинению (укорочению).

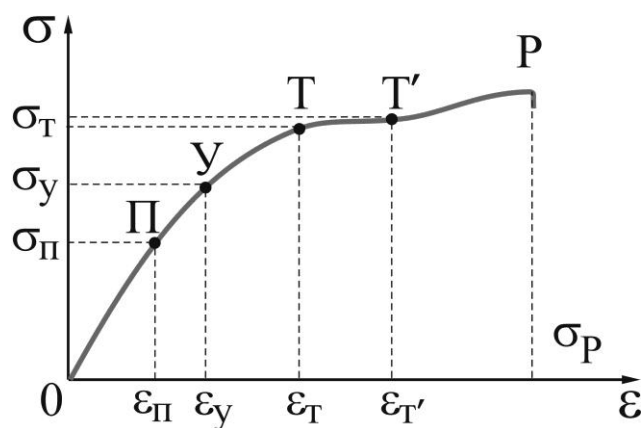


Рис. 1.30. Типичная зависимость напряжения σ от относительного удлинения ε для твердого тела

Кривая, описывающая зависимость напряжения σ от относительного удлинения ε после снятия напряжения за пределами упругости, не совпадает с кривой на участке ОУ, поскольку, как отмечено выше, форма тела не возвращается в исходное состояние. Это явление называют гистерезисом, а сам график – петлей гистерезиса. Площадь внутри петли гистерезиса пропорциональна энергии ΔU , необратимо потерянной в процессе растяжения и последующего возвращения в исходное состояние. Она рассеивается в виде тепла. Гистерезис определяется остаточными внутренними напряжениями. На рис. 1.31 изображена такая зависимость для изолированных (т.е. полученных в лабораторных условиях) ателектических легких человека. (Ателектаз – патологическое состояние, при котором ткань легкого теряет свою воздушность и спадается, уменьшая (порой значительно) его дыхательную поверхность) *.

* Подробное изложение данного вопроса можно найти в пособиях, представленных в поисковых системах Интернета по ключевым словам «Упругие свойства лёгких». Наиболее полно оно представлено в монографии Дж. Уэста «Физиология дыхания».

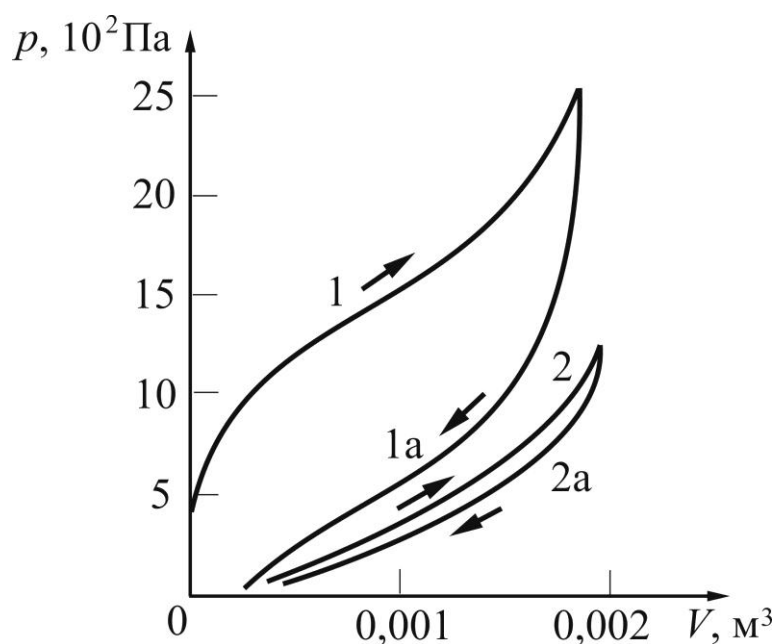


Рис. 1.31. Диаграммы изолированных ателектических лёгких человека.

1, 1а – растяжение и их последующее сжатие (соответственно) в воздушной среде; 2, 2а – растяжение и последующее их сжатие (соответственно) в физиологическом растворе; V – объем легких, p – давление [Зв]

Закон Гука для тканей организма работает только при кратковременных относительно небольших деформациях даже для костей. Кратковременное приложение силы выявляет в основном упругие свойства живой ткани, поскольку реакции ее вязких компонентов не успевают развиваться. Гладкие мышцы и другие компоненты стенок полых органов (желчного и мочевого пузырей, желудка, кишечника, венозных и лимфатических сосудов и т.д.) испытывают обычно длительное воздействие постепенно нарастающих растягивающих усилий. Только в самом начале действия силы они напрягаются, проявляя свои слабые упругие свойства, но затем напряжение их постепенно ослабевает (рис. 1.32а). Такое механическое свойство живых тканей называется пластичностью. Количественной мерой пластичности является отношение относительного удлинения к напряжению ε/σ . В системе кровообращения оно присуще венам. Благодаря пластичности венозные сосуды вмеща-

ют более двух третей всей крови человека. Обратное соотношение является мерой эластичности материала. Высокой эластичностью характеризуются, например, артерии (рис. 1.32б), выдерживающие большие нагрузки при сердечных сокращениях (см. подробно в разделе 2).

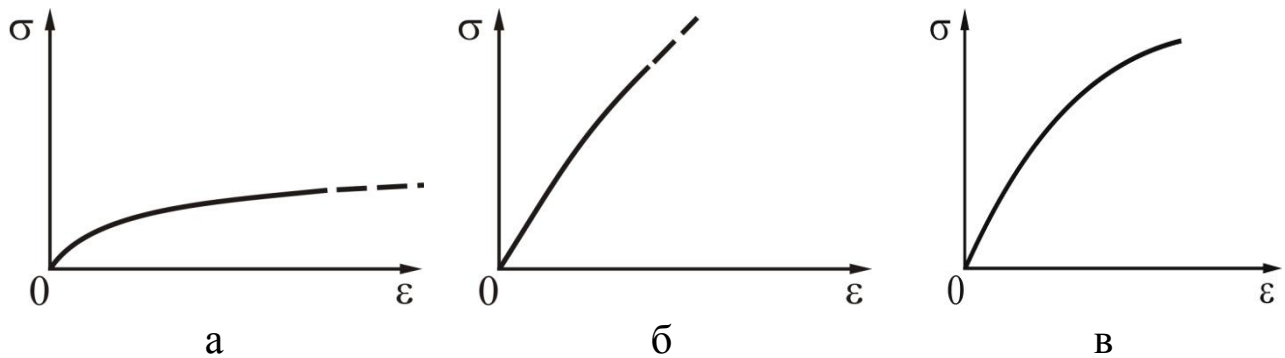


Рис. 1.32. Характерный вид зависимости напряжения σ от относительного растяжения ε : а) – пластичной ткани, б) – эластичной ткани, в) – костной ткани

Как технический материал биологическая ткань – композиционный материал, он образован объемным сочетанием химически разнородных компонентов. Механические свойства биологической ткани отличаются от механических свойств каждого взятого в отдельности компонента.

Костная ткань. Кость – основной материал опорно-двигательного аппарата. Примерно $2/3$ массы компактной костной ткани (0,5 объема) составляет неорганический материал, минеральное вещество – гидроксиапатит в кристаллической форме. Остальная часть кости состоит из органического материала, главным образом, из коллагена (высокомолекулярное соединение, волокнистый белок, обладающий высокой эластичностью). Кристаллы гидроксиапатита расположены между коллагеновыми волокнами (фибриллами).

Плотность костной ткани порядка 2400 кг/м^3 . Ее механические свойства зависят от многих факторов, в том числе от возраста, индивидуальных условий роста организма и, конечно, от участка организ-

ма. Композиционное строение кости придает ей нужные механические свойства: твердость, упругость и прочность. Зависимость напряжения σ от относительного растяжения ε для костной ткани имеет характерный вид, показанный на рис. 1.32в, т.е. подобна аналогичной зависимости для твердого тела; при небольших деформациях выполняется закон Гука. Величина модуля Юнга около 10 ГПа, предела прочности 100 МПа. Эти данные можно сопоставить с данными для капрона, армированного стеклом ($E = 8$ ГПа, предел прочности 150 МПа).

Кожа. Кожа на 60 % состоит из практически несжимаемой воды, далее волокон коллагена, эластина (волоконный белок так же, как и коллаген) и основной ткани – матрицы. Коллаген составляет около 75 % сухой массы, а эластин – около 4 % (модуль Юнга в пределах $10 \div 100$ Па, предел прочности 100 Па.). Эластин (0,5 МПа и 5 МПа, соответственно) растягивается очень сильно (до $200 \div 300$ %), примерно как резина. Коллаген может растягиваться до 10 %, что соответствует упругим свойствам капронового волокна.

Мышцы. В состав мышц входит соединительная ткань, состоящая из волокон коллагена и эластина. Поэтому механические свойства мышц подобны механическим свойствам полимеров. Как отмечалось выше, гладкие мышцы могут значительно растягиваться без особого напряжения (пластичны). На рис. 1.33 приведены зависимости относительной деформации (а) и напряжения (б) от длительности воздействия.

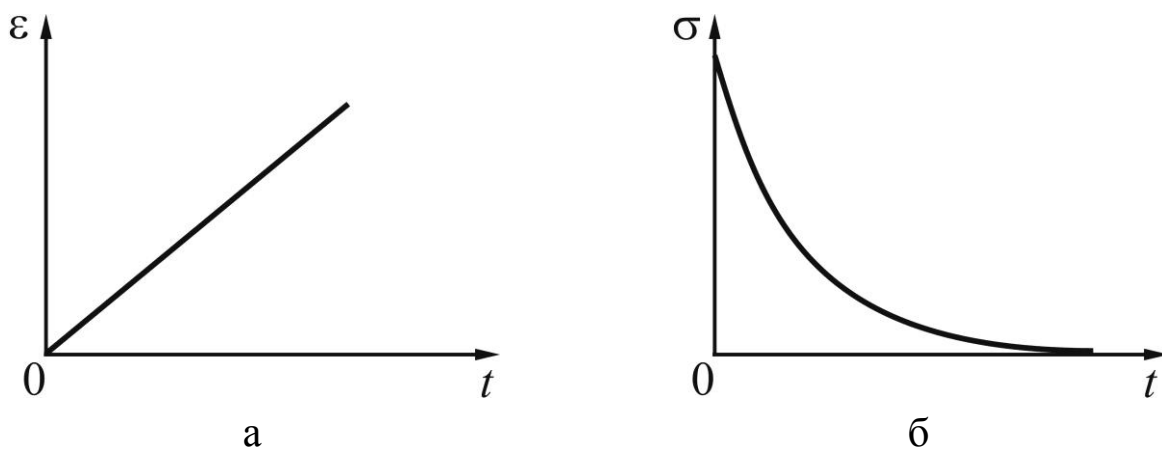


Рис. 1.33. Характерный вид зависимостей: а) – относительной деформации ε ; б) – напряжения σ от длительности воздействия для гладких мышц

Ткань стенки кровеносных сосудов (сосудистая ткань). Механические свойства кровеносных сосудов определяются, главным образом, свойствами коллагена, эластина и гладких мышечных волокон. Содержание этих составляющих сосудистой ткани изменяется по ходу кровеносной системы: отношение эластина к коллагену аорты в общей сонной артерии 2:1, а в бедренной артерии 1:2. С удалением от сердца увеличивается доля гладких мышечных волокон, в артериолах они уже являются основной составляющей сосудистой ткани.

При детальном исследовании механических свойств сосудистой ткани различают, каким образом вырезан из сосуда образец (вдоль или поперек сосуда). Можно, однако, рассматривать деформацию сосуда в целом, как результат действия давления жидкости (крови) изнутри на упругий цилиндр (рис. 1.34).

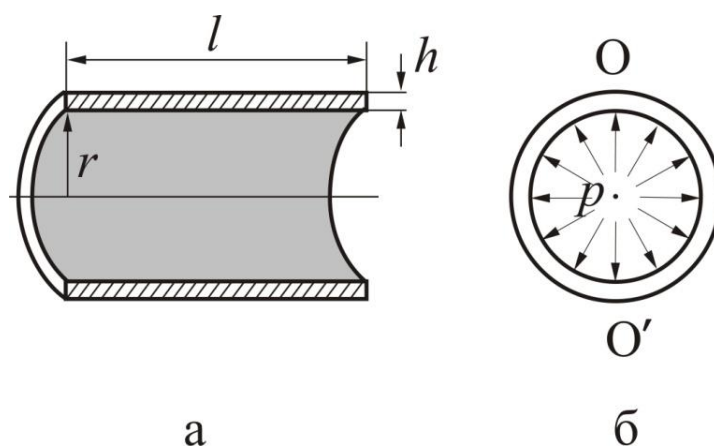


Рис. 1.34. Модель кровеносного сосуда; пояснения в тексте

Рассмотрим цилиндрическую часть кровеносного сосуда длиной l , толщиной h и радиусом внутренней части r . Сечения вдоль (заштриховано) и поперек оси сосуда (выделено серым фоном) цилиндра показаны на рис. 1.34. Две половины цилиндрического сосуда взаимодействуют между собой по сечениям стенок цилиндра (заштрихованные области на рис. 1.34а). (Методика последующего расчета основана на использовании модели поверхностного натяжения в жидкостях [1в]). Общая площадь этого «сечения взаимодействия» равна $2hl$. Если

в сосудистой стенке существует механическое напряжение σ , то сила упругого взаимодействия двух половинок сосуда (см. определение σ , формула 1.46) равна:

$$F = \sigma \cdot 2hl. \quad (1.49)$$

Эта сила уравнивается силами давления на цилиндр изнутри (они показаны стрелками на рис. 1.34б), которые растягивают их вдоль стенок сосуда, что и приводит к возникновению упомянутых выше упругих сил – упругого взаимодействия). Силы направлены под разными углами к горизонтальной плоскости (перпендикулярно к плоскости рисунка). Для того, чтобы найти их равнодействующую, следует просуммировать горизонтальные проекции. Однако проще найти равнодействующую сил, если умножить давление на проекцию площади полуцилиндра на вертикальную плоскость OO' . Эта проекция равна $2rl$. Тогда выражение для силы через давление имеет вид:

$$F = p \cdot 2rl, \quad (1.50)$$

где p – давление в сосуде. Приравнявая выражения 1.49 и 1.50, получим:

$$p \cdot 2rl = \sigma \cdot 2hl. \quad (1.51)$$

Откуда следует т.н. уравнение Ламе

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{h}. \quad (1.52)$$

Примем, что при растяжении сосуда объем его стенки не изменяется (площадь стенки возрастает, а толщина убывает), т.е. площадь сечения стенки сосуда не изменяется. Тогда

$$2\pi rh = \text{const, или } rh = b = \text{const.}$$

Таким образом, формула (1.51) трансформируется в формулу

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{h} = \frac{p \cdot r^2}{rh} = \frac{p \cdot r^2}{b}. \quad (1.53)$$

Из полученного выражения следует важный вывод, что в капиллярах (т.е. при $r \rightarrow 0$) напряжение стремится к минимальному значению ($\sigma \rightarrow 0$) [4а, 4б].

1.4. Силы трения

При перемещении соприкасающихся тел или частей одного и того же тела друг относительно друга возникают силы трения. В первом случае их называют внешними, во втором случае – внутренними. Это движение жидкостей и газов, движение твердого тела в жидкости или газе, поскольку слои жидкости или газа, непосредственно прилегающие к телу, перемещаются со скоростью тела, и на движение тела влияет трение между смежными слоями. Если между соприкасающимися телами нет прослойки, например, в виде смазки, то трение называется сухим. Если такая прослойка есть, то трение между телом и средой, а также трение между слоями самой среды называется вязким трением. Различают сухое трение скольжения и сухое трение качения. Силы трения скольжения направлены по касательной к трущимся поверхностям и противодействуют их относительному перемещению. Они действуют на оба тела как представлено на рис 1.35 ($\mathbf{F}_{\text{тр}} = -\mathbf{F}'_{\text{тр}}$), на котором изображено тело, скользящее по горизонтальной поверхности закрепленного тела 2 под действием силы $\mathbf{F}$.

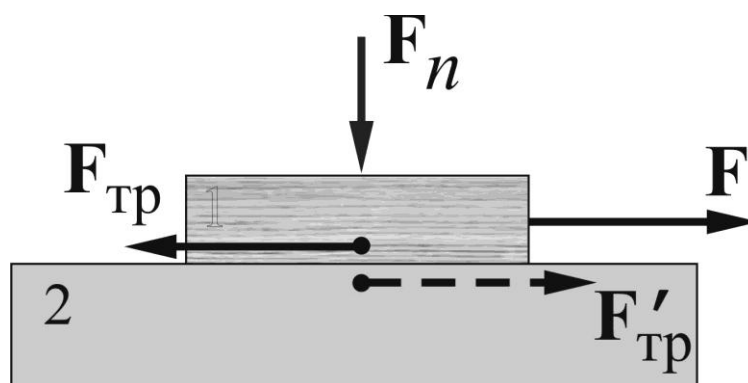


Рис. 1.35. К иллюстрации возникновения сил трения при скольжении тела по поверхности другого

Тело 1 прижимается к телу 2 с некоторой силой F_n (например, силой тяжести), направленной по нормали (перпендикулярно) к поверхности соприкосновения. Эта сила называется силой нормального давления, которая и определяет силу трения. Но сила трения возникает не только при движении, но и при попытках сдвинуть тело с места. Она возрастает с момента приложения силы, как представлено на рис. 1.36а, до некоторого значения F_0 , после чего тело начинает перемещаться, т.е. в интервале значений $0-F_0$ тело покоится. Это означает, что сила F , необходимая, чтобы сдвинуть тело, уравнивается некоей силой, равной ей по величине, но противоположно направленной. Это так называемая сила трения покоя. Очевидно, что сила трения скольжения $F_{тр}$ равна максимальному значению силы трения покоя F_0 . Сила трения скольжения не остается постоянной по мере увеличения скорости перемещения: вначале она несколько уменьшается и затем начинает возрастать, как это представлено на рис. 1.36а (но при гладких поверхностях сила трения практически не зависит от скорости перемещения тела).

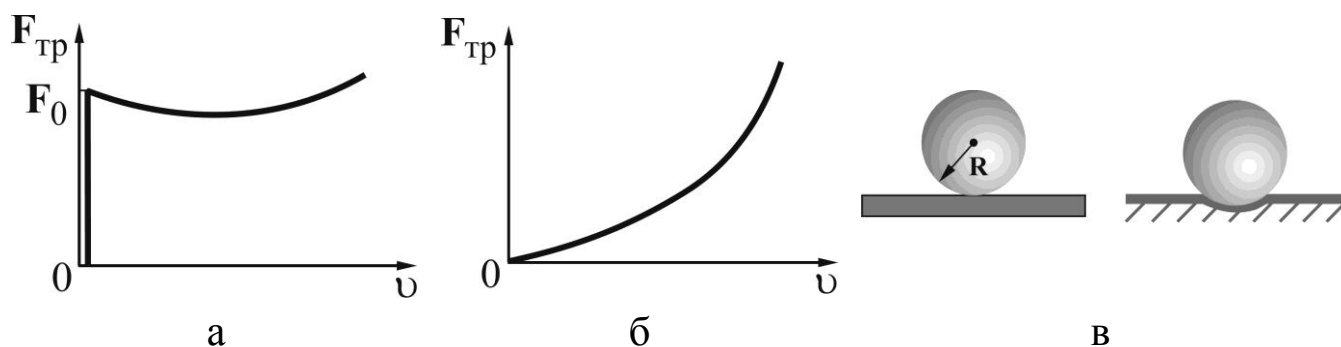


Рис. 1.36. а) – Зависимость силы сухого трения от скорости перемещения; б) – зависимость вязкого трения от скорости перемещения тела в потоке жидкости; в) – иллюстрация возникновения силы трения качения: чем глубже продавливается тело в подстилающую поверхность, тем больше сила трения (пояснения в тексте)

Абсолютная величина силы трения определяется соотношением (1.54):

$$F_{тр} = kF_n, \quad (1.54)$$

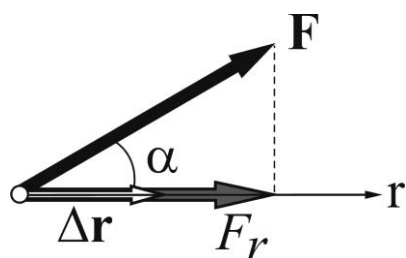
где k – коэффициент трения скольжения (покоя) – величина, не зависящая от площади соприкасающихся поверхностей. Она зависит от физических характеристик трущихся поверхностей и может зависеть от скорости перемещения. Тело 1 будет перемещаться с ускорением a под действием результирующей силы: $ma = F + F_{тр}$ (т.е. величина ускорения определяется соотношением $a = (F - kF_n)/m$). Зависимость вязкого трения от скорости тела в среде представлена на рис 1.36б. При малых значениях скорости сила трения пропорциональна первой степени скорости, а при больших скоростях – квадрату скорости перемещения тела. Трение покоя при вязком трении отсутствует, т.е. перемещение тела начинается при минимальном усилии. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе. Рассмотрение сил трения качения выходит за пределы программы. Отметим только общие закономерности. Сила трения тем меньше, чем больше радиус катящегося тела, чем выше твердость однотипных материалов в паре

«катящееся тело и подстилающая поверхность». Например, в паре закаленная сталь – закаленная сталь коэффициент трения порядка 0,01 мм (в отличие от безразмерной величины коэффициента трения скольжения коэффициент трения качения имеет размерность единицы длины). В паре резина–бетон он очень велик (от 15 до 35 мм) и зависит от упругих свойств резины. В определенной степени такую пару моделирует накаченное воздухом колесо, движущееся по твердому покрытию. Естественно, здесь упругие свойства колеса определяются в большей степени упругостью закаченного воздуха. Сила трения качения всегда меньше, когда твердость подстилающей поверхности выше твердости катящегося тела.

Силы трения играют двоякую роль. Ее стремятся уменьшить в различных механизмах, чтобы уменьшить затраты на ее преодоление. С другой стороны, без нее невозможна передача усилий в механических узлах (например, фрикционных передачах типа «ремень-шкив (колесо)», которыми заменяют зубчатые передачи (шестеренки)). Пожалуй, самые наглядные примеры даёт наша повседневная жизнь зимой: гололед и его последствия для пешехода и транспортного средства. В медицинской практике разные виды сил трения в совокупности с упругими силами используются, прежде всего, при проведении физиотерапевтических процедур (массаж, растирание кожи, втирание разного рода мазей в кожу в лечебных или косметических целях и т.п.), учитываются при конструировании различных средств передвижения и т.п.

1.5. Работа и энергия. Динамика вращательного движения

1.5.1. Работа и энергия. Закон сохранения энергии



Работа – это мера передачи движения или энергии от одного тела к другому. Энергия – количественная мера движения во всех формах этого движения.

Работа ΔA по перемещению тела, совершаемая под воздействием постоянной силы $\mathbf{F}$, определяется соотношением:

$$\Delta A = (\mathbf{F}\Delta\mathbf{r}) = F\Delta r \cos\alpha = F_r\Delta r, \quad (1.55a)$$

где α – угол между направлениями векторов действующей силы $\mathbf{F}$ и перемещения $\Delta\mathbf{r}$. Перемещение вдоль произвольной траектории l (рис. 1.37) можно представить в виде малых (элементарных) перемещений $\Delta\mathbf{r}_i$, которые совершаются под действием постоянной силы $\mathbf{F}_i$, при этом элементарная работа запишется как:

$$\Delta A_i = (\mathbf{F}_i\Delta\mathbf{r}_i) = F_i\Delta r_i \cos\alpha_i = F_{\Delta r_i}\Delta r_i. \quad (1.55b)$$

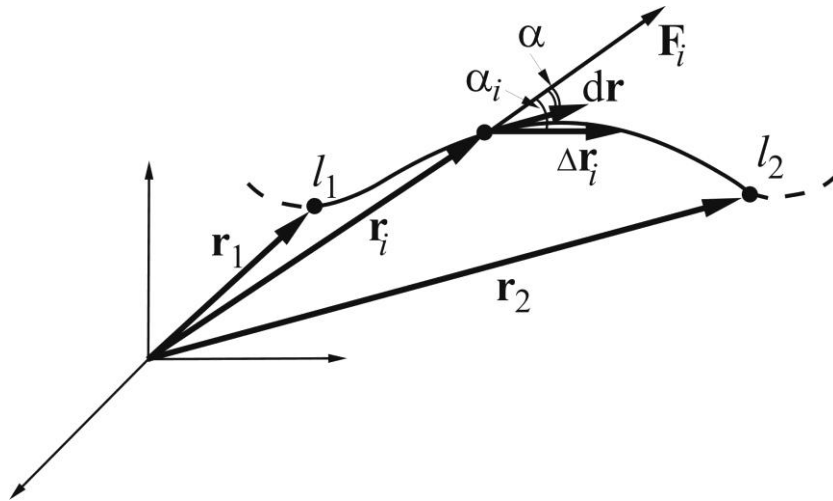


Рис. 1.37. К определению элементарной работы при перемещении вдоль произвольной траектории l

Работа на отрезке 1–2 приближенно равна:

$$A_{1,2} = \sum \Delta A_i = \sum \mathbf{F}_i\Delta\mathbf{r}_i = \sum F_{\Delta r_i} \cdot \Delta r_i \cos\alpha_i. \quad (1.55b)$$

При бесконечно малом перемещении по траектории $\Delta r_i \rightarrow dr$, $\cos\alpha_i \rightarrow \cos\alpha$, $F_{\Delta r_i} \rightarrow F_i$. Следовательно, бесконечно малая работа может быть записана как $\delta A = \mathbf{F}d\mathbf{r} = F_r dr = F_l dl$. Здесь F_l – проекция си-

лы на касательную к траектории в произвольной её точке r_i , dl – бесконечно малое перемещение по криволинейной траектории (эквивалентно ds , см. разд. 1.1.1). Тогда выражение (1.55в) трансформируется в выражение (1.56), которое определяет работу по перемещению на участке 1–2 произвольной траектории l :

$$A_{1,2} = \int_1^2 \mathbf{F} d\mathbf{r} = \int_1^2 F_r dr = \int_1^2 F_l dl. \quad (1.56)$$

Для определения скорости (быстроты) производства (совершения) работы вводится понятие *мощность*. Средняя мощность определяется как работа, совершённая за интервал времени Δt :

$$\langle N \rangle = \Delta A / \Delta t, \quad (1.57a)$$

а мгновенная мощность, т.е. мощность в данный момент времени, определяется соотношением:

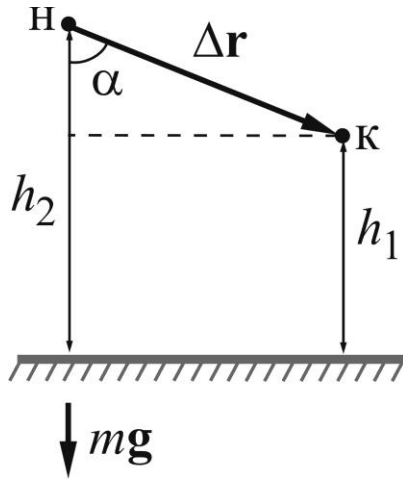
$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\delta A}{dt} \quad \text{или}$$

$$N = \mathbf{F} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = F \frac{dr}{dt} \cos \alpha = F v \cos \alpha, \quad (1.57b)$$

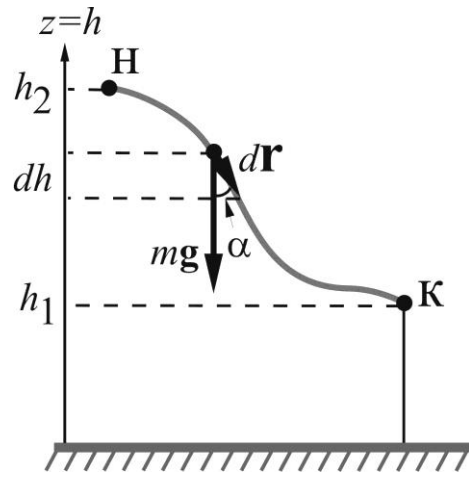
где v – скорость, с которой совершается работа δA за бесконечно малый промежуток времени dt (т.е. скорость перемещаемого тела).

1.5.1.1. Потенциальная энергия

Рассмотрим работу силы тяжести (работу в поле силы тяжести). Пространство, где действует сила тяжести, называется полем силы тяжести (гравитационным полем).



а



б

Рис. 1.38. К определению работы в поле силы тяжести при перемещении по прямой (а) и криволинейной траекториям (б)

Работа A_{12} по перемещению $\Delta \mathbf{r}$ тела массой m под действием силы тяжести по прямолинейной траектории равна

$$A_{H-K} = mg \Delta r \cos \alpha = -mg(h_1 - h_2) = mg(h_2 - h_1). \quad (1.58)$$

Для определения работы по криволинейной траектории воспользуемся уравнением (1.56), заменив обобщенную силу $\mathbf{F}$ на силу тяжести $m\mathbf{g}$:

$$A_{H-K} = \int_H^K m \mathbf{g} d\mathbf{r} = m \int_H^K g \cos \alpha dr = -mg \int_H^K dh = -mg(h_2 - h_1). \quad (1.58a)$$

Таким образом, работа в поле силы тяжести зависит только от начального и конечного положения тела в этом поле. Такие поля называют потенциальными, а силы – консервативными.

Перепишем выражение (1.58a) в виде:

$$\Delta A_{H-K} = E_{\Pi_K} - E_{\Pi_H}, \quad \text{где} \quad E_{\Pi_H} = mgh_1 \quad E_{\Pi_K} = mgh_2. \quad (1.59)$$

Величина $E_{\text{п}} = mgh$ называется потенциальной энергией. Таким образом, потенциальная энергия тела – это способность тела совершать работу вследствие нахождения тела в поле консервативных сил – в потенциальном поле. Работа совершается за счет убыли потенциальной энергии.

Таковыми же консервативными силами являются и силы упругости. Рассмотрим в качестве модели упругого тела пружину, изготовленную из упругого материала (рис. 1.39).

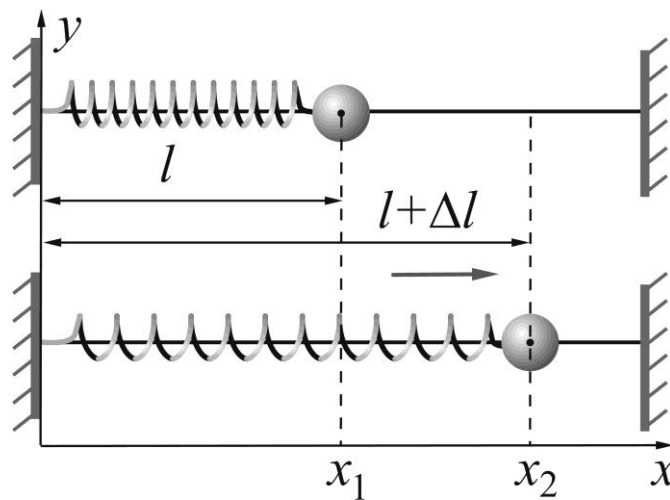


Рис. 1.39. К определению работы упругих сил

Работа dA по растяжению (сжатию) пружины на бесконечно малую величину dx равна $dA = Fdx = kx dx$ и при растяжении в пределах упругости определяется величиной

$$A_{12} = \int_{\text{н}}^{\text{к}} dA = \int_{\text{н}}^{\text{к}} -kx dx = -\frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2) = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2). \quad (1.60a)$$

Здесь x – текущее значение координаты, фиксирующей удлинение пружины dx . При возвращении в исходное состояние пружины упругая сила $F = -kx$ совершает работу

$$A_{21} = \int_K^H -kx dx = -\frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2) = E_{\Pi_2} - E_{\Pi_1}. \quad (1.60б)$$

Примем за начало отсчета координату со значением $x_1 = 0$, которой соответствует положение конца недеформированной пружины. Тогда $E_{\Pi} = \frac{kx^2}{2}$ – потенциальная энергия упругой деформации (т.е. энергия, запасенная в некотором объёме деформированной пружины – тела). Плотность энергии деформации, т.е. энергии, запасённую в единице объёма упругого деформируемого тела, определяют соотношением

$$u = \frac{\varepsilon^2 E}{2}, \quad (1.61)$$

где ε^2 – относительное удлинение пружины, E – модуль Юнга сжатия (растяжения).

1.5.1.2. Кинетическая энергия

Вновь рассмотрим простейший случай (рис. 1.40).

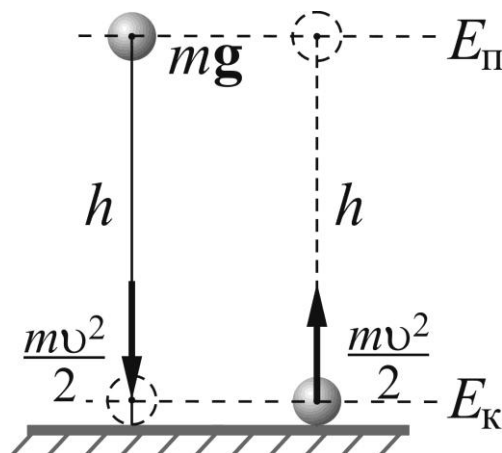


Рис. 1.40. Иллюстрация превращения потенциальной энергии в кинетическую и наоборот

Тело массой m свободно падает под действием силы тяжести с высоты h , где ее потенциальная энергия была равна $E_{\text{п}} = mgh$, с ускорением свободного падения g . Пролетев расстояние $h = \frac{gt^2}{2}$, к моменту соприкосновения с горизонтальной поверхностью тело приобрело скорость $v = gt$ (t – время падения; начальная скорость v_0 принята равной 0), см. формулу (1.4a).

Отсюда следует, что:

$$mgh = m \frac{g^2 t^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = E_{\text{к}}. \quad (1.62)$$

Величина $\frac{mv^2}{2} = E_{\text{к}}$ называется кинетической энергией. Т.е. кинетическая энергия – это энергия, которой тело обладает вследствие своего движения. Таким образом, вся потенциальная энергия перешла в кинетическую энергию. Эта кинетическая энергия произведет либо разрушительную работу при ударе о преграду, либо совершит положительную работу по перемещению другого тела, о которое оно ударится (так забивают сваи в грунт). Если соударение с поверхностью происходит без потерь энергии (т.е. абсолютно упругое), кинетическая энергия падающего тела полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Далее, за счет потенциальной энергии упругой деформации тело обретет начальную скорость (кинетическую энергию в момент отскока), достаточную, чтобы оно поднялось на ту же высоту h , с которой упало. Это модельный случай, в котором имеет место взаимопревращение потенциальной энергии в кинетическую энергию и наоборот. Естественно, в произвольной фазе движения тела суммарная энергия $E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$ остается неизменной (мы принимаем, что потерь энергии нет, т.е. это взаимопревращение энергии происходит в замкнутой системе).

Теперь рассмотрим общий случай. Воспользуемся вторым законом Ньютона для движения материальной точки

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad \text{или в виде} \quad m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}. \quad (1.63)$$

Умножая левую и правую части на бесконечно малое перемещение $d\mathbf{r}$, получим:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot d\mathbf{r} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}. \quad (1.63a)$$

Но $\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}$, тогда:

$$m\mathbf{v}d\mathbf{v} = \frac{md(\mathbf{v}\mathbf{v})}{2} = \frac{mdv^2}{2} = d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \mathbf{F}d\mathbf{r}. \quad (1.63б)$$

Из этого выражения следует, что если сила $\mathbf{F}=0$, т.е. система замкнутая, то и кинетическая энергия сохраняется (кинетическая энергия – интеграл движения в изолированной системе!). При наличии силы $\mathbf{F}$ кинетическая энергия расходуется на совершение работы $dA = \mathbf{F}d\mathbf{r}$. Проинтегрируем уравнение 1.63б и получим:

$$\int_1^2 \frac{dmv^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = E_{k_2} - E_{k_1} = \int_1^2 \mathbf{F}d\mathbf{r} = A_{12}. \quad (1.64)$$

Т.е увеличение кинетической энергии обусловлено работой внешних сил.

С другой стороны, работа в потенциальном поле, как уже отмечалось, совершается за счёт убыли потенциальной энергии:

$$A_{12} = E_{k_2} - E_{k_1}, \quad A_{21} = E_{п_2} - E_{п_1}.$$

Поскольку $A_{12} = -A_{21}$, можно записать:

$$E_{п_1} - E_{п_2} = E_{k_2} - E_{k_1} \quad \text{или} \quad E_{п_1} + E_{k_1} = E_{п_2} + E_{k_2} = E, \quad (1.65)$$

т.е. полная энергия сохраняется. Это утверждение и есть закон сохранения механической энергии: в замкнутой (изолированной) системе полная механическая энергия сохраняется (т.е. в данной системе полная энергия является интегралом движения). Очевидно, если система незамкнутая, её полная энергия изменяется на величину, равную работе внешних сил:

$$\Delta E = A_{\text{вн}}. \quad (1.65a)$$

1.5.2. Динамика вращательного движения

Реальное тело движется как материальная точка только в том случае, если точка приложения силы O' и центр инерции (тяжести, масс) находятся на одной линии, совпадающей с направлением действия силы $\mathbf{F}$ (рис. 1.41 а).

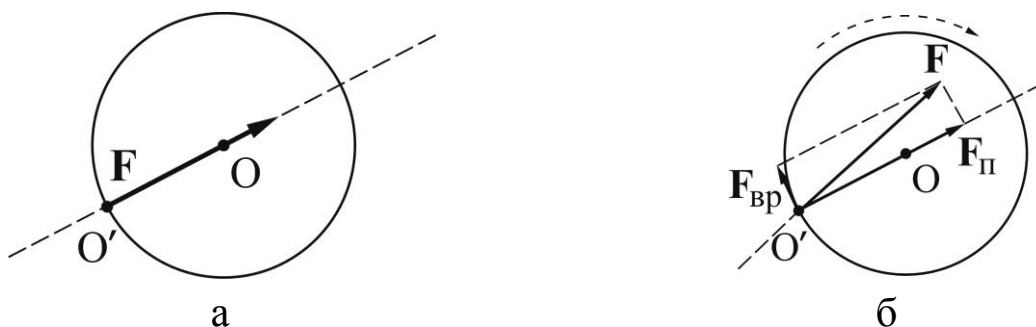


Рис. 1.41. Зависимость движения тела от направления и точки приложения силы. а) – Центральный удар – движение поступательное; б) – компонента $\mathbf{F}_{\text{вр}}$ силы $\mathbf{F}$ задаёт вращательное движение, а компонента $\mathbf{F}_{\text{п}}$ – поступательное. В результате тело будет двигаться по сложной траектории

Во всех остальных случаях действие силы приводит к вращению вокруг некоей мгновенной оси вращения, проходящей через точку O (центр инерции тела), перемещающуюся в пространстве, (рис. 1.41б) и динамика движения определяется более сложными уравнениями.

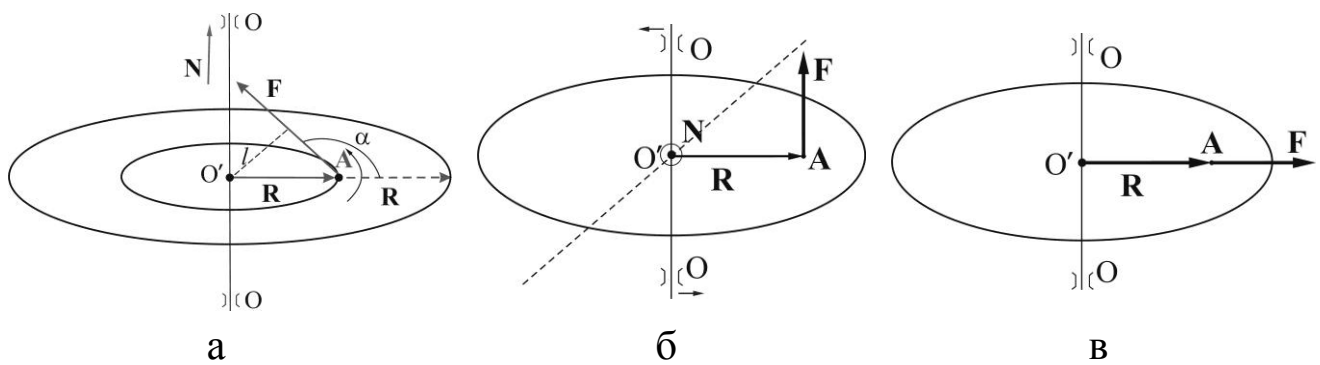


Рис. 1.42. К иллюстрации воздействия разнонаправленной силы на тело с закреплённой осью вращения. Схематически изображён диск, закреплённый на оси OO' . Точка приложения силы $\mathbf{F}$ расположена на расстоянии $\mathbf{R}$ от центра вращения O' . Представлены три частных случая: а) – сила $\mathbf{F}$ расположена в плоскости диска и приводит к вращению диска относительно оси OO' ; б) – сила $\mathbf{F}$ действует $\perp$ плоскости вращения; в) – сила $\mathbf{F}$ направлена вдоль $\mathbf{R}$ (пояснения в тексте)

1.5.2.1. Момент силы

При описании вращательного движения для характеристики воздействия силы $\mathbf{F}$ вводится величина, называемая моментом силы $\mathbf{N}$

$$\mathbf{N} = [\mathbf{R}\mathbf{F}], \quad (1.66a)$$

численное значение (модуль) которой равно

$$N = F \cdot l, \quad (1.66b)$$

где l – плечо действующей силы $\mathbf{F}$, равное кратчайшему расстоянию от центра вращения O до направления действия силы, т.е. $l = R \sin \alpha$ (рис. 1.42а). Направление вектора момента сил $\mathbf{N}$ определяется правилом правого буравчика (винта).

На рис. 1.42а вектор действующей силы расположен в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Если сила направлена под углом к этой

плоскости, то вращение вызывает только та компонента силы $\mathbf{F}$, которая лежит в плоскости $\perp$ оси вращения. Если сила $\mathbf{F} \perp$ плоскости вращения, то она создаёт вращательный момент $\mathbf{N}$, стремящийся повернуть ось вращения, как указано на рис. 1.42б (значок $\odot$ означает, что вектор $\mathbf{N}$ направлен в сторону наблюдателя). Если сила $\mathbf{F}$ лежит в плоскости вращения, т.е. $\perp$ оси вращения, но она направлена вдоль вектора $\mathbf{R}$ (рис. 1.42в), то вращательный момент не возникает, и приложенная сила стремится сместить ось вращения вдоль направления её действия, т.е. вдоль $\mathbf{R}$. Во всех случаях принимается, что ось вращения зафиксирована (не свободная, места закрепления обозначены как λ λ).

1.5.2.2. Уравнение динамики вращательного движения тела

Теперь получим уравнение движения в случае вращения тела относительно неподвижной оси (рис. 1.43).

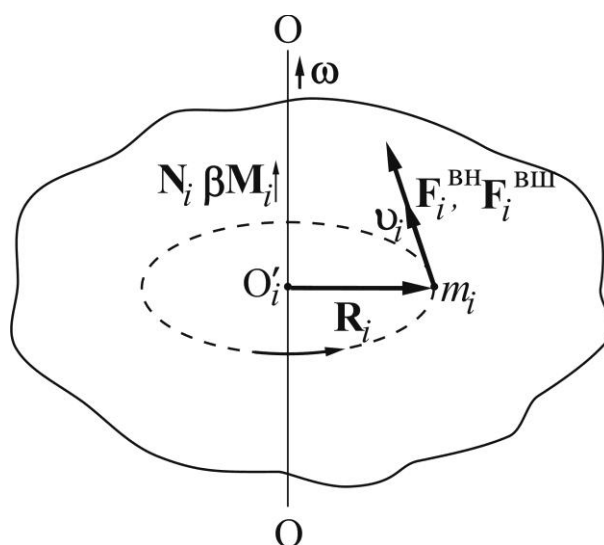


Рис. 1.43 Кинематические и динамические величины, характеризующие вращение твёрдого тела относительно неподвижной оси вращения OO' . Система координат расположена в произвольной точке вращения O'_i элемента массы m_i . Векторы действующих сил, радиуса вращения $\mathbf{R}_i$ и линейной скорости $\mathbf{v}_i$ лежат в плоскости вращения. Векторы момента сил $\mathbf{N}$, углового момента $\mathbf{M}$ направлены вдоль оси вращения, как и вектор угловой скорости ω и углового ускорения β (в случае увеличения угловой скорости)

Предельно упростим задачу и рассмотрим только компоненты сил, направленные по касательной к окружности, вдоль которой движется элементарная масса m_i (материальная точка) с линейной скоростью $\mathbf{v}_i$, вектор которой также направлен вдоль этой касательной (система координат расположена в центре вращения элементарной массы m_i). Уравнение её движения запишем в виде:

$$\frac{dm_i \mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{F}_i^{\text{BIII}} + \mathbf{F}_{ij}^{\text{BH}}, \quad (1.67)$$

где $\mathbf{F}_{ij}^{\text{BH}}$ – внутренние силы, действующие на материальную точку (силы взаимодействия между элементами массы тела m_i и m_j), $\mathbf{F}_i^{\text{BIII}}$ – внешняя сила. Поскольку $\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}$ (все элементы массы вращаются с одинаковой угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$), а $\mathbf{v}_i = [\boldsymbol{\omega} \mathbf{R}_i]$ (см. уравнение 1.7), то уравнение 1.67 можно переписать в виде:

$$\frac{dm_i \mathbf{v}_i}{dt} = m_i \left[\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}, \mathbf{R}_i \right] = m_i [\boldsymbol{\beta} \mathbf{R}_i] = \mathbf{F}_i^{\text{BIII}} + \mathbf{F}_{ij}^{\text{BH}}, \quad (1.67a)$$

где $\boldsymbol{\beta}$ – угловое ускорение $\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$.

Умножим обе части уравнения (1.67a) на $\mathbf{R}_i$:

$$m_i [\mathbf{R}_i [\boldsymbol{\beta} \mathbf{R}_i]] = [\mathbf{R}_i \mathbf{F}_i^{\text{BIII}}] + [\mathbf{R}_i \mathbf{F}_{ij}^{\text{BH}}]. \quad (1.67b)$$

Согласно правилу тройного векторного произведения векторов

$$[\mathbf{R}_i [\boldsymbol{\beta} \mathbf{R}_i]] = \boldsymbol{\beta} (\mathbf{R}_i \mathbf{R}_i) + \mathbf{R}_i (\mathbf{R}_i \boldsymbol{\beta}) = \boldsymbol{\beta} R_i^2,$$

поскольку скалярное произведение векторов $(\mathbf{R}_i \mathbf{R}_i) = R_i^2$, а скалярное произведение векторов $(\mathbf{R}_i \boldsymbol{\beta}) = 0$. Таким образом, уравнение (1.67b) преобразуется в уравнение

$$\beta m_i R_i^2 = [\mathbf{R}_i \mathbf{F}_i^{\text{вн}}] + [\mathbf{R}_i \mathbf{F}_{ij}^{\text{вн}}]. \quad (1.67\text{в})$$

Суммируя по всем индексам i и j , получим

$$\beta \sum m_i R_i^2 = [\mathbf{R}_i \mathbf{F}_i^{\text{вн}}]. \quad (1.67\text{г})$$

Поскольку сумма моментов внутренних сил равна нулю (по третьему закону Ньютона внутренние силы равны по величине, но противоположно направлены, следовательно, и создаваемые ими моменты сил также равны по величине и действуют в противоположных направлениях), то уравнение (1.67г) превращается в уравнение (1.68)

$$I\beta = \mathbf{N}. \quad (1.68)$$

Здесь $I = \sum m_i R_i^2$ – момент инерции тела относительно выбранной оси вращения (аналог массы тела при поступательном движении тела), $\sum [\mathbf{R}_i \mathbf{F}_i^{\text{вн}}] = \mathbf{N}$ – суммарный момент внешних сил. Очевидно, что угловая скорость ω , угловое ускорение β (при увеличении угловой скорости) и момент сил $\mathbf{N}$ имеют одинаковые направления, как это представлено на рис. 1.43.

Уравнение (1.68) – уравнение движения для вращающегося твердого тела (т.е. аналог II закона Ньютона для поступательного движения)*.

Очевидно, что значения моментов инерции зависят от формы тела (симметрии) и выбора оси вращения. Для любого тела существуют три взаимно перпендикулярные проходящие через центр инерции (массы) тела оси, которые могут служить свободными осями инерции, т.е. такими осями вращения, которые сохраняют своё положение в пространстве при отсутствии внешнего воздействия на них. Такие

* При строгом выводе уравнения (1.68) предполагается, что положение элемента массы определяется радиус-вектором $\mathbf{r}_i$, отсчитываемым от общего центра координат, расположенного на оси вращения. Последующие математические операции над векторами приводят к тем же результатам.

оси инерции называются главными осями инерции (приведены на рис. 1.44). Моменты инерции относительно главных осей вращения называются главными моментами инерции.

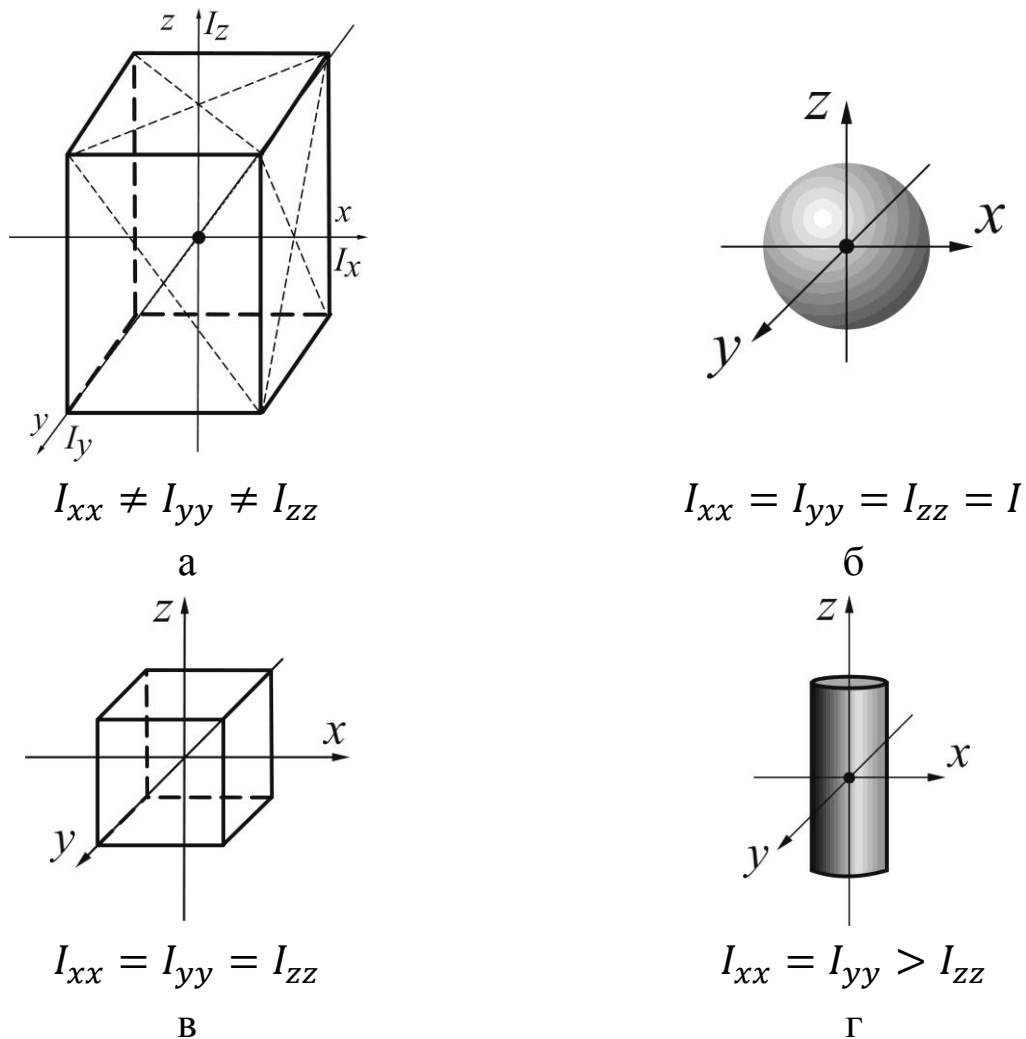


Рис. 1.44. Главные значения моментов инерции однородных тел различной симметрии: а) – параллелепипед; б) – сфера (бесконечное число осей вращения с одинаковыми значениями момента инерции); в) – куб (кубическая симметрия); г) – цилиндр (цилиндрическая симметрия): главное значение момента инерции относительно продольной оси вращения меньше одинаковых главных значений момента инерции относительно бесконечного числа главных осей вращения, перпендикулярных продольным осям вращения

Момент инерции тела относительно произвольной оси $O'O'$ равен сумме моментов инерции этого тела относительно оси OO , проходящей через центр масс этого тела, и произведению массы тела m на квадрат расстояния d между осями $O'O'$ и OO (см. рис. 1.45а), т.е.

$$I_{O'O'} = I_{OO} + md^2. \quad (1.69)$$

Это соотношение известно как теорема Штейнера.

Характер вращения относительно свободных осей вращения (т.е. сохраняющих направления оси вращения в пространстве в отсутствии опоры) и несвободных осей вращения (например, один конец оси вращения закреплён) существенно различается. В первом случае устойчивыми будут вращения вокруг осей вращения, относительно которых главные значения момента инерции имеют максимальное или минимальное значение. Во втором случае устойчивыми будут вращения вокруг главной оси, которой соответствует максимальное значение момента сил (например, стержень или диск, подвешенные на нити, будут вращаться так, как представлено на рис. 1.45б, в).

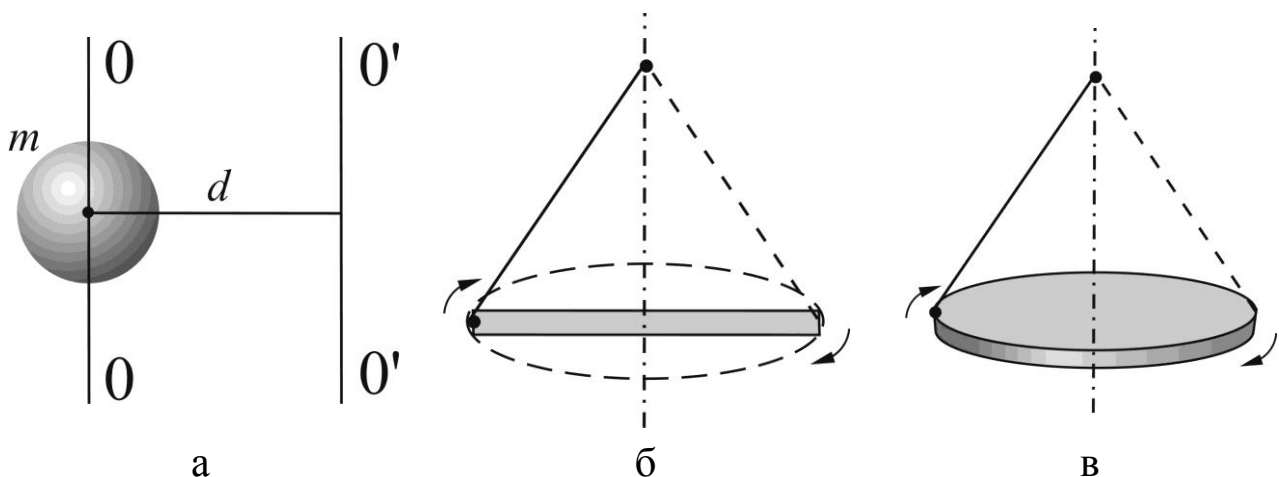


Рис. 1.45. а) – Пояснения к теореме Штейнера, б) – и в) – иллюстрации устойчивого вращения при закреплённой оси вращения

1.5.2.3. Закон сохранения момента импульса. Уравнение моментов

Импульс материальной точки можно рассматривать в качестве динамической характеристики материальной точки. Её аналогом при вращении материальной точки является вектор момента импульса $\mathbf{M}$ (угловой момент)

$$\mathbf{M} = m[\mathbf{R}\mathbf{v}]. \quad (1.70)$$

Его модуль равен $m\omega R$, а направление определяется также правилом «правого буравчика» (см. рис. 1.46а).

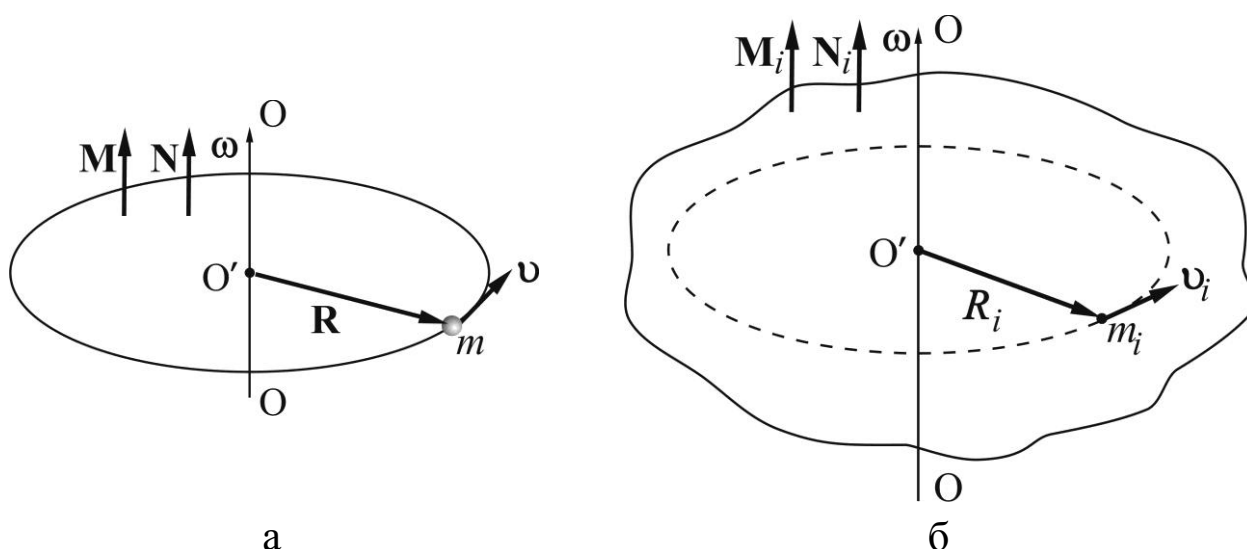


Рис. 1.46. Иллюстрация вращения: материальной точки – а); твердого тела – б) относительно неподвижной оси вращения OO'

Для элементарной массы m_i численное значение углового момента равно $M_i = m_i R_i v_i$. Поскольку $v_i = \omega R_i$, то $M_i = \omega m_i R_i^2$. Суммирование по всем абсолютным значениям момента импульса M_i дает численное (абсолютное) значение момента импульса вращающегося тела M , выраженное через момент инерции I и угловую скорость ω :

$$M = \sum M_i = \sum \omega m_i R_i^2 = \omega \sum m_i R_i^2 = I\omega \quad (1.71)$$

или в векторном виде:

$$\mathbf{M} = I\boldsymbol{\omega}. \quad (1.71a)$$

Изменение угловой скорости вращения, соответственно и момента импульса, возможно лишь при внешнем воздействии, т.е. под воздействием момента внешних сил $\mathbf{N}$, и эта взаимосвязь устанавливается соотношением (при неподвижной оси вращения)

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = I\boldsymbol{\beta} = \mathbf{N}. \quad (1.72)$$

Это и есть уравнение моментов, или закон сохранения момента импульса: момент импульса тела $\mathbf{M}$ в изолированной системе, т.е. при $\mathbf{N} = 0$, не изменяется.

Кинетическая энергия вращающегося тела определяется следующим образом:

$$E_k = \sum \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum \frac{m_i \omega^2 R_i^2}{2} = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (1.73)$$

а работа dA , которую надо затратить, чтобы повернуть тело на бесконечно малый угол, определяется соотношением

$$dA = Nd\varphi. \quad (1.74)$$

Здесь N – численное значение момента внешних сил относительно оси вращения.

Итак, три основных закона сохранения (интегралов движения) определяют движение тела в изолированной системе: законы сохранения импульса, момента импульса и полной механической энергии.

В заключение приведем таблицу кинематических и динамических величин и уравнений, характеризующих поступательное и вращательное движение тела (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Сопоставление формул механики вращательного движения относительно произвольной оси вращения, проходящей через центр инерции (масс) тела, с аналогичными формулами механики поступательного движения (механики материальной точки)

Поступательное движение	Вращательное движение
v – линейная скорость	ω – угловая скорость
$a = \frac{dv}{dt} = \dot{v}$ – линейное ускорение	$\beta = \frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение
m – масса	I – момент инерции
$p = mv$ – импульс	$M = I\omega$ – момент импульса
F – сила	N [или N] – момент силы
$F = \frac{dp}{dt}$	$N = \frac{dM}{dt}$
$am = F$	$\beta I = N$
$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2$ (для неподвижной оси вращения)
$dA = F_s ds (\equiv F_l dl)$	$dA = Nd\varphi$

1.5.3. Биомеханическая мускульная работа

Рефлекторные движения человека следуют законам динамики даже во сне. Особенно наглядно это иллюстрирует подъём из постели или со стула из положения «сидя». Биомеханика этого процесса весьма сложна, поэтому ограничимся только его схематическим представле-

нием (рис. 1.47) как иллюстрацией роли моментов сил тяжести, возникающих при вставании со стула. Примем во внимание 4 условные оси вращения, соответственно расположенные: в голеностопном суставе – O^1 (она неподвижна в этом приближении); в коленном – O^2 , тазобедренном – O^3 и шейном – O^4 суставах. Примем также, что тело перемещается только в плоскости рисунка. Выделим четыре основных элемента массы с условными центрами инерции (массы): голень (O_{Γ}), бедро (O_{δ}), туловище (O_{Γ} , принимаем, что руки неподвижны относительно туловища) и голову ($O_{\text{гол.}}$). Идеальным для положения тела, как совокупности механических частей, является расположение на стуле с прямоугольной геометрией (рис. 1.47а) и положением «стоя» (рис. 1.47в). В этом случае центры масс находятся на одной вертикали, проходя через точку опоры O^1 . В обоих положениях моменты сил тяжести фрагментов тела уравновешены.

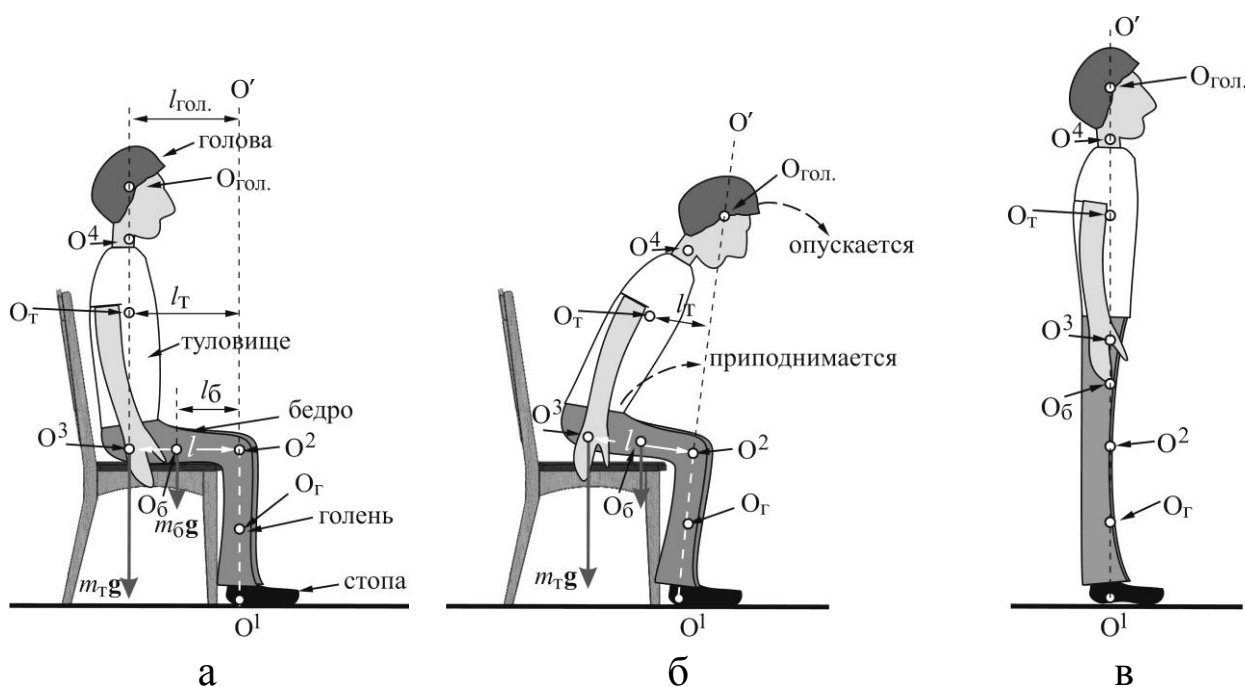


Рис. 1.47. Схематическое представление перехода из положения «сидя» в положение «стоя»: а) – механическая модель устойчивого равновесия в положении «сидя»; б) и в) – положения тела в промежуточном состоянии

Но человек не механическое устройство, и оба положения не физиологичны: для удержания тела в этих положениях необходимы усилия всего мышечного корсета человека. Это совершенно другая тема, лишь частично затронутая в этом пособии. Формулируем вопрос в таком виде: как из положения «сидя» занять положение «стоя». Инструкций и рекомендаций в Интернете можно найти множество (к сожалению, без графики), но все они сводятся к следующему. Человек несколько смещается вперёд по сидению стула, далее наклоняет вперед туловище и голову, уменьшая плечи сил тяжести, действующих на фрагменты тела: головы – $l_{\text{г}}$, туловища – $l_{\text{т}}$, бёдер – $l_{\text{б}}$ (для голени не приведено, поскольку её вклад здесь наименьший). Далее бедра усилием мышц отрывают от стула, постепенно туловище приподнимается и распрямляется. На всем пути минимизируются мышечные усилия по преодолению сил тяжести фрагментов тела.

Скелетные мышцы и мышечные группы совершают механическую работу, при этом источником энергии являются биохимические процессы в организме. Работа любой мышцы опорно-двигательного аппарата человека основана на способности мышцы к сокращению. В момент мышечного сокращения сама мышца укорачивается, а обе точки крепления к костям сближаются одна относительно другой. При этом подвижная точка (*insertion* – место прикрепления мышцы) начинает приближаться к начальной неподвижной точке мышцы крепления *origin*, что сопровождается относительным перемещением частей тела. Таким образом, прилагая разную степень мышечного усилия, выполняется определенная механическая работа (подъем тяжести, перемещение конечности тела с грузом и т.п.). Размер мышечного сокращения определен длиной мышечного волокна. Соединения костей и взаимодействие с мышечными группами устроено в форме механического рычага, позволяющего выполнять простейшую работу по поднятию и передвижению предметов.

Из повседневной практики нам известно, что чем дальше от упора (мгновенной оси вращения) приложена сила, т.е. чем больше рычаг,

тем с меньшими усилиями можно выполнить работу. Так и в биомеханике – чем дальше от опорной точки крепится мышца, тем более эффективно будет использована ее сила. П.Ф. Лесгафт* квалифицировал мышцы на сильные, имеющие крепление дальше от опорной точки, и быстрые или ловкие, имеющие точку крепления вблизи опоры.

Для движения вокруг одной опорной точки необходимо наличие двух мышц на противоположных от нее сторонах. Направления движения в биомеханике имеют свои определения: сгибание и разгибание, приведение и отведение, горизонтальное приведение и горизонтальное отведение, ротация медиальная и ротация латеральная.

Мышца, которая при сокращении приводит к возникновению момента сил и принимает на себя основную нагрузку, называется *агонистом*. Каждое сокращение мышцы-агониста приводит к полному расслаблению противоположной ей мышцы – *антагониста*. Если мы выполняем сгибание в локте, агонистом будет сгибатель локтя – бицепс (двуглавая мышца плеча), а антагонистом в этот момент будет разгибатель локтя – трицепс (трехглавая мышца плеча). После окончания движения моменты сил, создаваемые этими мышцами, будут уравновешены, а сами мышцы находятся в немного растянутом состоянии. Это явление называется мышечным тонусом. Мышцы, помогающие выполнять движение мышце-агонисту и действующие в одном с ним направлении, но испытывающие меньшую нагрузку и меньшую

* П.Ф. Лесгафт (20.09.1837 – 22.11.1909) – биолог, анатом, антрополог, врач, педагог. Больше известен как создатель теоретической функциональной анатомии и научной системы физического воспитания. Прогрессивный общественный деятель. В 1869–1871 гг. работал экстраординарным профессором Казанского императорского университета.

степень сокращения, называются *синергистами**. Мышцы, обеспечивающие устойчивость и равновесие определенному суставу при выполнении движения, называются *фиксаторами*. Помимо фиксаторов значительную роль в тренировочном процессе выполняют мышцы *стабилизаторы*, которые работают в качестве элементов равновесия тела при смещении центра тяжести и увеличении общей силовой нагрузки. Кроме того, мышцы стабилизаторы участвуют в повседневной жизни человека в обеспечении равновесного расположения частей тела относительно друг друга вне зависимости от силовой нагрузки.

В любой момент движения кости образуют механические рычаги, следуя за мышечными усилиями. Биомеханика выделяет 2 вида биомеханических рычагов – *рычаг 1 рода*, где точки приложения силы расположены с противоположных сторон от оси, и *рычаг 2 рода*, где точки приложения силы располагаются по одну сторону от оси, но на разном от нее расстоянии.

Рычаг 1 рода называется в биомеханике «рычагом равновесия» (рис. 1.48а). Поскольку точка опоры расположена между двумя точками приложения силы, рычаг еще называют «двуплечим» (условие равновесия – равенство по модулю моментов сил, действующих в противоположных направлениях, $F_1l_1=F_2l_2$). Такой рычаг имеет место, например, в соединении позвоночника и черепной коробки (рис. 1.48б). Если вращающий момент силы, действующей на затылочную часть черепа, равен вращающему моменту силы тяжести, действующему на переднюю часть, разнонаправленное действие моментов сил не ощущается и мышцы не напряжены. Это обстоятельство используется в быту –

* Синергисты (от греч. synergós – вместе действующие) в анатомии и физиологии – мышцы (или группы мышц), действующие совместно и функционально однородно; принимают участие в одном движении. Например, у млекопитающих животных и человека такие синергисты, как наружные межрёберные и межхрящевые мышцы, а также мышцы диафрагмы, сокращаясь одновременно, обеспечивают акт вдоха. Явление синергии обеспечивается регулирующей деятельностью центральной нервной системы [поиск по ключевому слову «Синергисты» dic.academic.ru].

так, например, на Востоке девушки носят кувшины с водой на голове. На примере рычага первого рода можно продемонстрировать т.н. «золотое правило механики» (рис. 1.48в). Невесомая доска установлена на опору: на разно удаленные концы доски (l_1 и l_2) действуют разные по величине силы F_1 и F_2 .

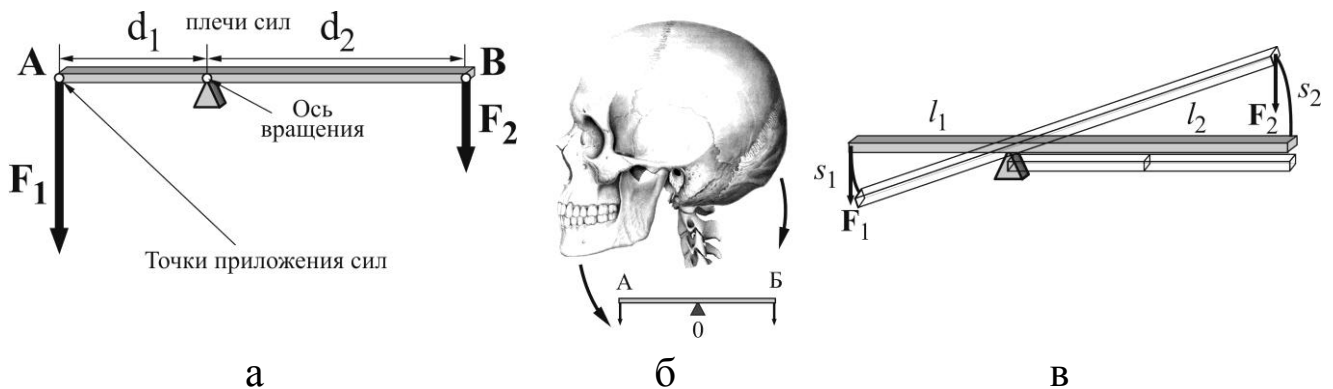


Рис. 1.48. а) —, б) — Рычаги первого рода; в) — иллюстрация «золотого правила механики»

Чтобы поднять груз, расположенный на расстоянии l_2 (обозначим вес груза как силу противодействия F_2), на противоположном конце рычага в точке, расположенной на расстоянии l_1 от опоры, необходимо приложить усилие F_1 , определяемое из условия $F_1 l_1 > F_2 l_2$. По завершении подъема на некоторую высоту точки 1 и 2 переместятся соответственно на расстояния s_1 и s_2 . Очевидно, работа (см. раздел 1.5) по подъему груза (преодолению сопротивления силы F_2) равна работе, совершаемой за счет силы F_1 . Из этого следует, что $F_2 s_2 = F_1 s_1$. Т.е. выигрывая в силе, мы проигрываем в расстоянии, и наоборот, проигрывая в силе, выигрываем в расстоянии. Это и есть «Золотое правило механики». Время движения обоих концов доски одинаково, следовательно, груз на конце длинного плеча перемещается с большей скоростью, чем точка приложения силы к концу более короткого рычага. Поэтому короткий рычаг называют «рычагом скорости», длинный рычаг — «рычагом силы». Это правило широко и весьма эффективно использует-

ся в самых разных ситуациях. Известное высказывание, приписываемое Архимеду, «Дайте мне точку опоры, и я сдвину землю» породило термин «Архимедов рычаг», употребляемый в значении: двигательная сила вообще.

Рычаг 2 рода представлен на рис 1.49. В биомеханике он подразделяется на два вида: «рычаг силы» и «рычаг скорости».

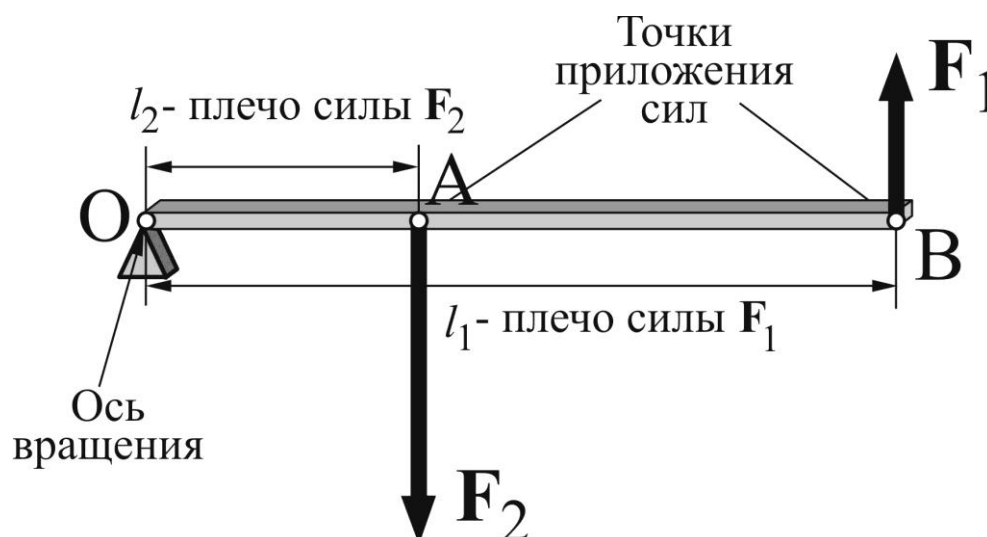


Рис. 1.49. Рычаг второго рода

Название и действие этих рычагов зависит от места расположения приложения нагрузки, но у рычагов обоих видов точка приложения силы и точка приложения сопротивления находятся по одну сторону от оси вращения, поэтому оба рычага являются «одноплечими». Рычаг силы образуется при условии, что плечо приложения силы мышц длиннее плеча приложения силы тяжести (сопротивления). В качестве примера можно продемонстрировать человеческую стопу (схематически эта разновидность рычагов представлена на рис 1.50а).



Рис. 1.50. а) – Рычаг силы, б) – рычаг скорости

Условно «осями вращения» (в приведенных здесь примерах больше подходит термин «ось поворота», «поворотная ось») здесь являются головки плюсневых костей (условная точка O), пяточная кость (точка O₁) служит точкой приложения мышечного усилия голеностопного сустава, а сила тяжести тела F_g образует силу сопротивления в голеностопном суставе. Здесь имеет место выигрыш в силе за счет более длинного плеча приложения мышечной силы и проигрыш в скорости. Как видно из рис. 1.50а, плечо силы противодействия (силы тяжести) короче, чем плечо приложения мышечной силы. Примером рычага скорости может служить работа мышц сгибателей в локтевом суставе (схематически представлено на рис. 1.50б). Бицепс крепится вблизи оси «вращения» (локтевой сустав), и при таком коротком плече необходима дополнительная сила мышце сгибателя. Здесь имеет место выигрыш в скорости и ходе движения, но проигрыш в силе. Можно заключить, что чем ближе от места опоры будет крепиться мышца, тем короче будет плечо рычага и тем значительнее будет проигрыш в силе (короткорукие, длиннорукие – распространенные понятия).

При соединении двух костных пар образуется биокинетическая пара, характер движения в которой определяется строением костного сочленения (сустава), работой мышц, сухожилий и связок. Подвижность в суставе может зависеть от многочисленных факторов. Прежде всего, это анатомический – форма костей во многом определяет направление и размах кости в суставе. Далее, центрально-нервной регуляцией тонуса мышц, а также напряжением мышц-антагонистов. А именно, от способности расслаблять растягиваемые мышцы и напрягать сокращаемые мышцы. Иными словами, от степени межмышечной координации. Естественно, подвижность суставов зависит от пола и возраста.

Для того, чтобы оптимально и правильно принять исходное положение для выполнения физических действий, необходимо руководствоваться свойствами рычагов первого и второго типов. Если мы изменим положение конечности или туловища, то определенным образом изменится длина плеча рычага конечности или туловища. Очевидно, в любом случае исходное положение всегда выбирается таким образом, чтобы начальный период тренировки сопровождался менее нагружающими положениями конечностей и корпуса. В дальнейшем, в зависимости от физического состояния и формы тренирующегося (а также от вида физической нагрузки, например, вида спорта), можно постепенно увеличивать длину плеча рычага, для усиления воздействия на определенную мышечную группу. Увеличение силы противодействия одновременно с удлинением плеча рычага, в свою очередь, еще больше акцентирует внимание на укреплении силы конкретной мышечной группы или одной мышцы.

Для осуществления технически грамотного движения при физических нагрузках необходимо знать, как работает сустав, соединяющий активную мышечную группу.

Опорно-двигательный аппарат человека представляет собой различные костные сочленения, соединенные друг с другом посред-

ством суставов, структура которых и определяет возможности совершать те или иные движения. Виды и названия суставов можно найти в соответствующей литературе по *анатомии*, а виды и описание осей вращения и анатомических плоскостей, определяющих возможность осуществить то или иное движение, приведены в пособиях по *кинезиологии*^{*}. При написании этого раздела использовался материал, содержащийся в [5а, 5б].

^{*} Кинезиология – (кинезис – движение, логос – учение) – научная и практическая дисциплина, изучающая мышечное движение во всех его проявлениях. Кинезиологию следует отличать от различных методов хиропрактики, имеющих в своём названии слово «кинезиология» – «прикладная кинезиология» (англ. Applied kinesiology), «образовательная кинезиология» (англ. Edu-K) и других, научная обоснованность которых либо отсутствует, либо является спорной.

РАЗДЕЛ 2. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

2.1. Давление и сжимаемость

Введем основные определения, необходимые для описания механики жидкости и газа. На рис. 2.1 представлена схема простейшего опыта: цилиндр, в котором под поршнем находится газ (жидкость).

Под воздействием поршня возникает упругая сила, численно равная внешнему воздействию. Частицы жидкости или газа действуют друг на друга с силой, равной силе сжатия. Это воздействие называется давлением. Очевидно, что давление равномерно распределяется во всех направлениях, в чём легко убедиться, наблюдая за струями жидкости, вытекающими под давлением через одинаковые отверстия в стенках цилиндра.

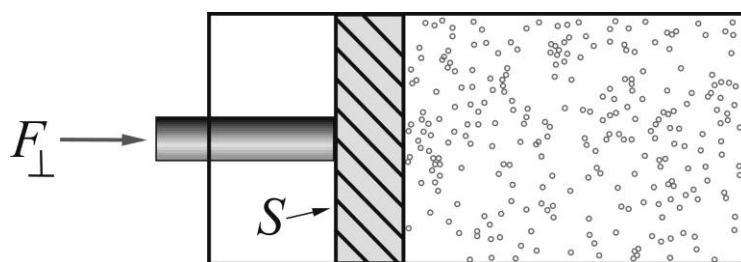


Рис. 2.1. Схема элементарной установки для определения характеристик газа (жидкости)

Количественная мера давления – отношение численного значения силы, действующей перпендикулярно площади выделенного объема, к величине этой площади:

$$p = \frac{F_{\perp}}{S} \quad (2.1)$$

Единицы давления:

СИ: $1 \text{ н/м}^2 = 1 \text{ Па}$ (паскаль).

СГС: $1 \text{ дин/см}^2 = 1 \text{ бар}$.

1 Па = 10^{-5} бар.

Внесистемные единицы: 1 бар = 10^5 Па.

Техническая атмосфера: 1 ат = $1 \text{ кгс/см}^2 = 0,98$ бар.

Физическая атмосфера: 1 атм = 1,01 бар.

1 мм рт. ст. = 1 тор; 760 мм рт. ст. = 1 атм;

1 мм рт. ст. = 13,6 мм вод. ст.; 1 мм вод. ст. = 9,8 Па.

Для определения упругих характеристик вводится понятие сжимаемость

$$\chi = - \frac{\Delta V}{V \Delta p}. \quad (2.2)$$

Знак " – " означает, что с увеличением давления объём уменьшается, что соответствует положительным величинам для коэффициента сжимаемости, $\chi > 0$. Оценим величину давления Δp , необходимого для относительного сжатия на 1% (т.е. $\frac{\Delta V}{V} = 10^{-2}$), например воды, для которой $\chi = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$:

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V} / \chi = \frac{10^{-2}}{5 \cdot 10^{-10}} = 0,2 \cdot 10^8 \text{ Па} = 200 \text{ атм.}$$

Для воздуха сжимаемость в нормальных условиях на порядок больше.

Давление в покоящейся жидкости (гидростатическое), как известно из курса физики средней школы, зависит от высоты столба жидкости (газа) (рис. 2.2):

$$\Delta p = \rho g h_1 - \rho g h_2 \quad (2.3)$$

или

$$p_2 - p_1 = \rho g (h_2 - h_1), \quad p = p(h). \quad (2.4)$$

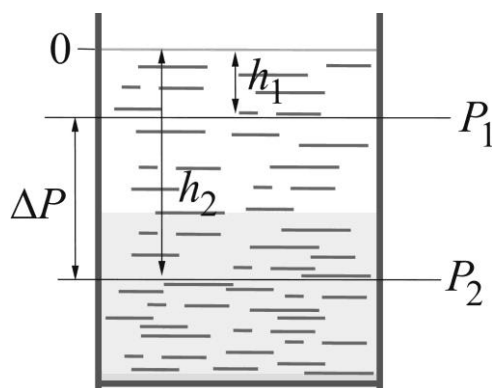


Рис. 2.2. Давление в покоящейся жидкости

2.2. Элементы гидро(аэро)динамики

Гидродинамика представляет собой раздел механики сплошных сред, в котором изучается движение несжимаемых жидкостей (газа) и взаимодействие их с твердыми телами. В определённых пределах основные положения гидродинамики применимы для описания потока газа. В контексте данного пособия мы будем описывать движение жидкости. При необходимости различия в потоках жидкости и газа будут отмечаться. Основные положения гидродинамики базируются на теореме неразрывности струи, уравнении Бернулли и критерии подобия (Рейнольдса). В теоретической модели движущаяся несжимаемая жидкость характеризуется полем векторов скорости частиц жидкости. Движение потока изображается так называемыми линиями тока, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлениями векторов скорости (рис. 2.3).

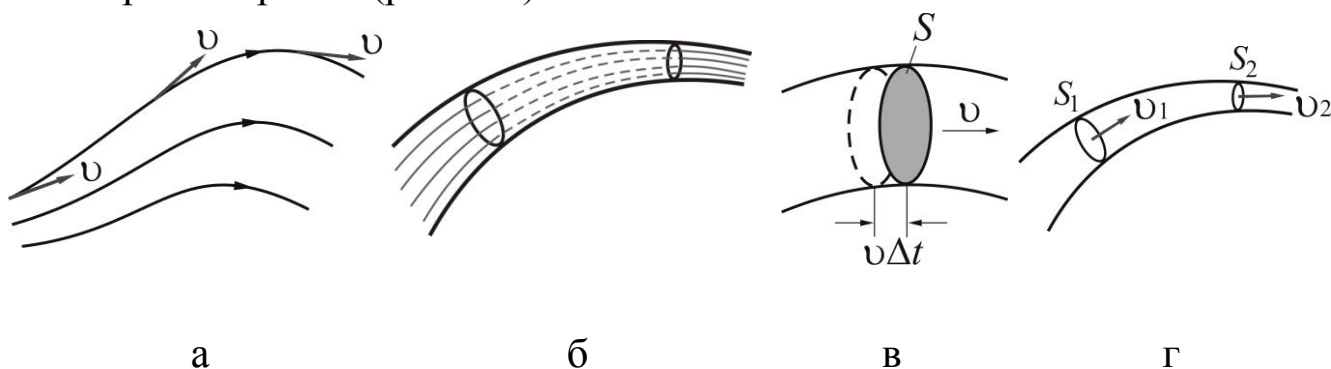


Рис. 2.3. а) – Линии тока, б) – трубка тока; в) и г) – иллюстрации к теореме неразрывности струи

При установившемся (стационарном) течении жидкости скорости частиц в любой точке потока (сечении трубки тока) не меняются со временем. Естественно, при этом линии тока совпадают с траекториями частиц жидкости.

Любая часть потока, ограниченная линиями тока, может быть представлена трубкой тока, сечение S которой мало настолько, что скорость потока по сечению одинакова (рис. 2.3б). При слоистом (ламинарном) движении жидкости линии тока не разрываются, не пересекаются и не выходят за пределы трубки тока. При таких условиях через любое сечение трубки тока (перпендикулярное линии тока) за одинаковое время Δt протекает одинаковое количество жидкости (см. рис. 2.3 в, г):

$$\Delta Q_1 = S_1 v_1 \Delta t = \Delta Q_2 = S_2 v_2 \Delta t, \quad (2.5)$$

где ΔQ_1 и ΔQ_2 – объемы жидкости, протекающей через сечения S_1 и S_2 с одинаковыми по всему сечению скоростями v_1 и v_2 , соответственно. Отсюда следует, что

$$S_1 v_1 = S_2 v_2. \quad (2.5a)$$

Это и есть, т.н. теорема неразрывности струи*. (Величину Sv иногда называют объемной скоростью (объемным расходом) движущейся жидкости).

Используя это равенство, можно получить полную динамическую характеристику потока в виде уравнения Бернулли, справедливого для любой трубки тока (т.е. любого сечения, рис. 2.4) для идеальной жидкости (т.е. жидкости, в которой отсутствует внутреннее трение):

* В общем случае уравнение неразрывности струи записывается в виде: $\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$, где ρ_1 и ρ_2 плотности жидкости или газа. Но условие (2.5a) выполняется в широком диапазоне характеристик потока.

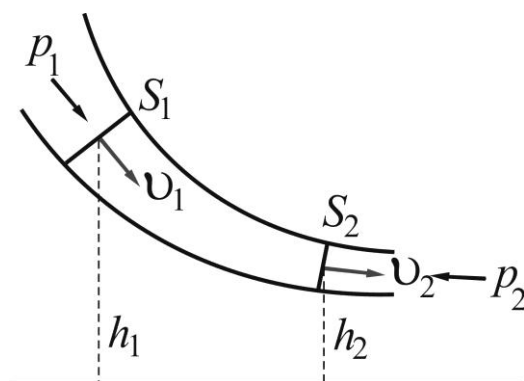


Рис. 2.4. Иллюстрация к выводу уравнения Бернулли

$$p_1 + \rho v_1^2/2 + \rho g h_1 = p_2 + \rho v_2^2/2 + \rho g h_2, \quad (2.6)$$

где ρ – плотность жидкости, p_1 и p_2 – статические давления жидкости в двух сечениях трубки тока; v_1 и v_2 – скорости жидкости в этих сечениях; $\rho v_1^2/2$ и $\rho v_2^2/2$ – динамическое давление жидкости в этих же сечениях, соответственно; h_1 и h_2 – высоты выделенного сечения над некоторым уровнем, принятым за нулевой уровень; $\rho g h_1$ и $\rho g h_2$ – величины гидростатического (гидравлического, весового) давления, создаваемого весом вертикального столба жидкости высотой h . Это уравнение справедливо для любого сечения трубки тока, поэтому в любом сечении трубки тока выполняется условие

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = \text{const.} \quad (2.6a)$$

В случае, когда оба сечения находятся на одинаковой высоте ($h_1 = h_2$),

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const.} \quad (2.6b)$$

Статическое давление p – это давление, которое оказывают друг на друга смежные (прилегающие друг к другу) слои жидкости. Его можно измерить манометром, который движется вместе с жидкостью.

Динамическое давление $\rho v^2/2$ обусловлено движением жидкости. Гидростатическое давление ρgh , как отмечалось выше, создается весом вертикального столба жидкости высотой h . Итак, уравнение Бернулли формулируется следующим образом:

При стационарном течении идеальной жидкости полное давление, равное сумме статического, динамического и гидростатического давлений, одинаково во всех поперечных сечениях трубки тока. Уравнение Бернулли применимо и для движения реальной жидкости в ограниченной геометрии, например, в трубке при определенных условиях.

Представим себе гладкую трубку, в которой движется поток невязкой жидкости. Линии тока будут представлять собой равноудаленные параллельные линии, как показано на рис. 2.5а, повторяющие профиль трубы. Скорости частиц потока одинаковы в любом сечении потока. Если на пути потока невязкой жидкости находится, например, шар в середине потока или имеется обтекаемый выступ на трубке, то линии тока изменятся, как показано на рис. 2.5б, в: в областях потока А, В и С скорость будет выше, чем в других. В реальной жидкости за счет сил межмолекулярного взаимодействия «жидкость – поверхность трубы» образуется пограничный слой жидкости (тонкие слои жидкости «прилипают» к стенкам трубы), который практически не перемещается внутри трубки. Но поскольку между слоями жидкости имеется также межмолекулярное взаимодействие, то в потоке возникает градиент скорости потока $\left(\frac{dv}{dz}\right)$: скорость в середине потока максимальная, а вблизи поверхности трубы практически равна нулю (рис. 2.5г).

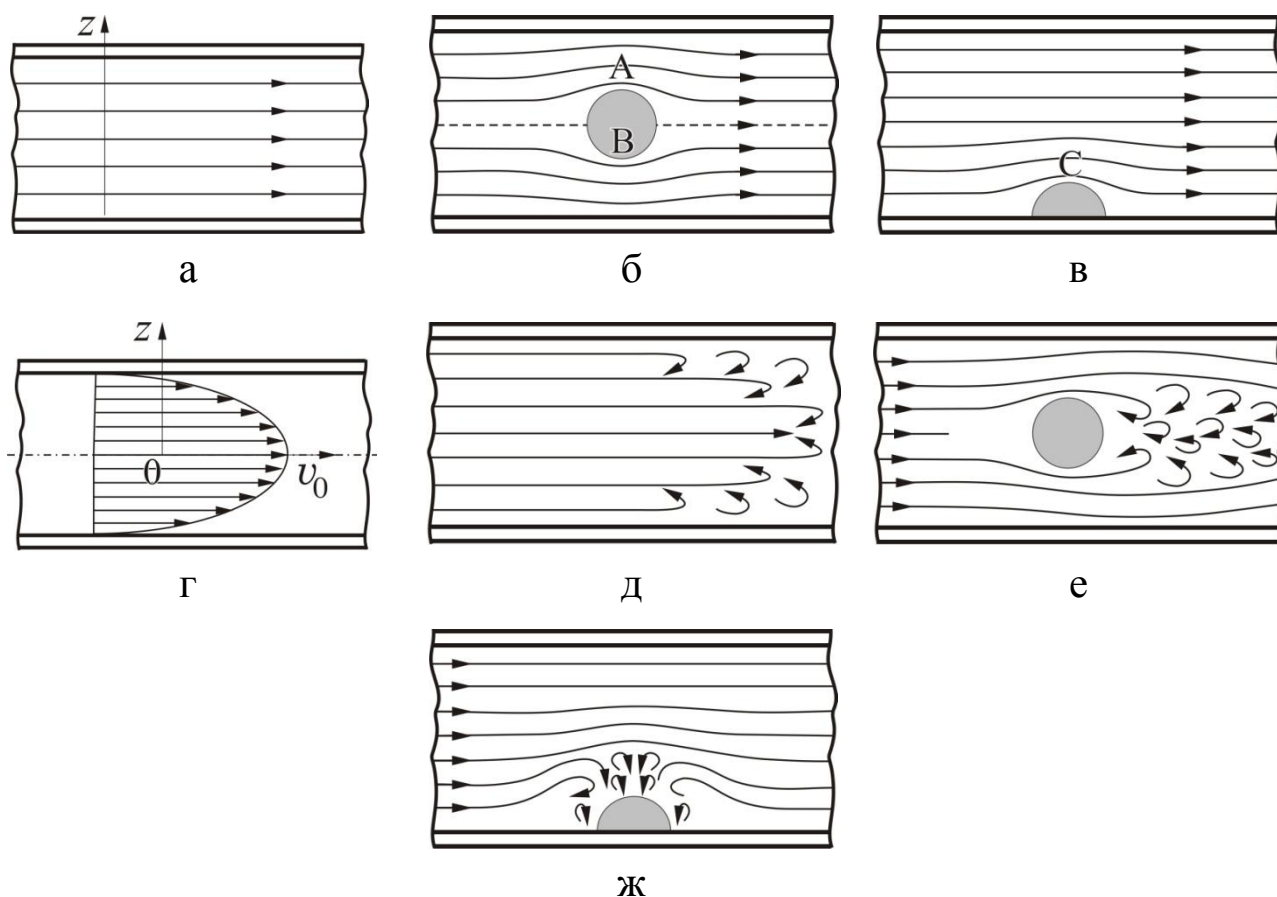


Рис. 2.5. Схематическое представление потока жидкости: а) – невязкой жидкости; б) –, в) – невязкой жидкости в трубе при обтекании препятствия, г) – ньютоновской жидкости при ламинарном течении, д) – при возникновении турбулентности потока в трубе без препятствия; е) –, ж) – при обтекании препятствия

Таким образом, поток вязкой жидкости перемещается, преодолевая сопротивление – силу вязкого (внутреннего трения), которое определяется формулой Ньютона (2.7)

$$F_{\text{тр}} = \eta^* \left| \frac{dv}{dz} \right| S. \quad (2.7)$$

* η – коэффициент внутреннего трения (коэффициент вязкости, вязкость, динамическая вязкость). Величина η/ρ , где ρ – плотность жидкости, называется кинематической вязкостью.

(отсюда и название – ньютоновская жидкость). Точно так же на поверхности шара (выступа) образуется пограничный слой, создается градиент скорости в потоке жидкости, обуславливая так называемое лобовое сопротивление потоку при наличии препятствия (или лобовое сопротивление движущемуся в потоке телу). В условиях ограниченной геометрии движение жидкости определяется числом Рейнольдса.

Число Рейнольдса для потока жидкости, характеризуемой динамической вязкостью η и плотностью ρ , текущей со средней скоростью $\langle v \rangle$ в длинных трубках с диаметром d , определяется соотношением

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta}. \quad (2.8)$$

Критическое число Рейнольдса для потока жидкости в длинных трубках $Re_{кр} = 2000\text{--}2300$. При меньших значениях числа Рейнольдса движение жидкости является ламинарным. При значениях $Re > Re_{кр}$ может возникнуть турбулентность, и при $Re \gg Re_{кр}$, движение жидкости переходит в турбулентное (вихревое). Отметим, что теорема неразрывности струи и уравнение Бернулли достаточно хорошо выполняются для реальных жидкостей, вязкость которых не очень велика. При этом соответствие модели реальной физической системе устанавливается на основе принципа подобия Рейнольдса: в любых системах «труба-жидкость» потоки будут одинаковы, если одинаковы числа Рейнольдса. Естественно, до тех пор, пока сохраняется ламинарное течение потока.

При превышении некоторой величины скорости потока, определяемой критерием Рейнольдса (2.7), происходит отрыв частиц жидкости от частиц жидкости, непосредственно прилегающих к поверхности препятствия. Ламинарное движение переходит в турбулентное движение (рис 2.5д, е, ж). Увеличению скорости частиц в потоке соответствует, согласно уравнению Бернулли (2.6б), увеличение динамического давления и понижению статического давления [1а, 1в]. Если в потоке жидкости содержатся взвешенные частицы, то они будут оседать на поверхности тел, соприкасающихся с потоком в зоне турбулентности

(см. рис. 2.5е, ж.) Типичный пример – покрытые пылью задние стекла автомобиля при движении по проселочной дороге.

2.3 Вопросы гемодинамики

Раздел биомеханики, в котором исследуется движение крови по сосудистой системе, называется гемодинамикой. Первые фундаментальные исследования в этой области связывают с именем Пуазейля*.

2.3.1. Кровь как объект исследования движения жидкости

Прежде чем рассматривать вопросы, связанные с движением крови, следует кратко дать ее основные характеристики как объекта физического и физико-химического исследования. Кровь – это подвижная соединительная ткань жидкой среды организма, состоящая из двух основных компонентов: плазмы и взвешенных в ней форменных элементов (клеток лейкоцитов, постклеточных структур – эритроцитов и тромбоцитов (кровяные пластинки))**.

Отстоявшаяся кровь состоит из трёх слоёв: верхний слой образован желтоватого цвета плазмой крови, средний, сравнительно тонкий серый слой, составляют лейкоциты, нижний красный слой образуют эритроциты. У взрослого здорового человека объём плазмы достигает 50–60 % объёма цельной крови, а форменных элементов крови – около 40–50 %. Отношение форменных элементов крови (иногда только эритроцитов) к её общему объёму называется гематокритным числом H_t (от др.-греч. αἷμα – кровь, κριτός – показатель) или гематокритом.

* Жан Луи Мари Пуазейль, в (фр. *J. L. Poiseuille*) – французский врач и физик, член Французской медицинской академии (1842), занимался вопросами кровообращения и дыхания животных и людей, в 1828 г. впервые применил для измерения артериального давления животных ртутный манометр, экспериментально установил закон истечения жидкости (ламинарного течения) через тонкую цилиндрическую трубку (закон и течение Пузейля).

** В среднем, у мужчин в норме объём крови составляет 5,2 л, у женщин – 3,9 л, тогда как у новорожденных её количество составляет 200÷350 мл. Массовая доля крови в общей массе тела человека для взрослого человека составляет 6–8 %.

Плазма крови (от греч. πλάσμα – нечто сформированное, образованное) – жидкая часть крови, которая содержит воду (порядка 90 %) и взвешенные в ней вещества – белки (в основном альбумины, глобулины и фибриноген). Неорганические вещества составляют около 2–3 % (катионы (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) и анионы (HCO_3^- , Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-})). Органические вещества (около 9 %) в составе крови подразделяются на азотсодержащие (белки, аминокислоты, мочевина ...) и безазотистые (глюкоза, фосфолипиды, холестерин...). Также в плазме крови содержатся газы (кислород, углекислый газ) и биологически активные вещества (гормоны, витамины, ферменты, медиаторы). Гистологически плазма является межклеточным веществом жидкой соединительной ткани (крови).

Как объект физико-химического исследования (физической химии), кровь представляет собой полидисперсную систему – суспензию* эритроцитов в плазме: эритроциты находятся во взвешенном состоянии, белки образуют коллоидный раствор, мочевина, глюкоза и другие органические вещества и соли представляют собой гомогенный (однородный) водный раствор.

Поскольку кровь является суспензией (гетерофазной, гетерогенной системой) и, как уже отмечалось выше, расслаивается при отстаивании под действием силы тяжести, компоненты крови разделяются, например, путем центрифугирования (раздел 1.2.6.2). Это обстоятельство существенно отличает поток крови от потока гомогенной вязкой жидкости, поскольку распределение частиц крови по сечению сосуда

* Суспензия, взвесь (от лат. suspensio, подвешивание) – смесь веществ, где твёрдое вещество (или нерастворимая компонента) распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном (не осевшем) состоянии. Суспензия – это грубодисперсная система с твёрдой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой. Обычно частицы дисперсной фазы настолько велики (более 10 мкм), что оседают под действием силы тяжести (седиментируют). Суспензии, в которых седиментация идёт очень медленно из-за малой разницы в плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды, иногда называют взвесями. В концентрированных суспензиях дисперсные структуры легко возникают и разделяются [http://elhow.ru/zdorove/biohimija-krovi/chto-takoe-krov?utm_source=users&utm_medium=ct&utm_campaign=ct]

будет зависеть от массы этих частиц. *Тромбоциты, например, движутся в непосредственной близости к стенкам сосудов. Их основная функция – восстановление сосудов в случае их повреждения. Перемещаются они свободно вместе с кровотоком и задерживаются лишь в тех местах, где поток крови переходит в более спокойное состояние (селезенка, печень, подкожная ткань)*.*

Кровь не является ньютоновской жидкостью, однако плазму можно считать ньютоновской жидкостью. Необходимо принимать во внимание и то обстоятельство, что, как будет показано в следующих разделах, кровь движется по трубке (не путать с «трубкой тока» – понятием, используемым при описании потока жидкости) с эластичными или пластичными, а не с жесткими стенками. Тем не менее, общие принципы гидродинамики вполне применимы для описания движения крови в различных сосудах кровеносной системы. Принято считать, что оно соответствует условиям ламинарного движения потока (по крайней мере, в кровеносных сосудах человека без патологий в спокойном состоянии). По разным оценкам число Рейнольдса для крови варьируется в пределах $Re_{кр}=500\div 1600$. Возникновение турбулентности потока крови в определенных местах кровеносной системы человека рассматривается как один из факторов образования тромбов (сгустков крови, состоящих из фибринов). *К другим факторам относятся: – замедление или прекращение течения крови в капиллярах (стаз); – повреждение стенок сосудов и воспалительные процессы в них; – изменение состава и свойства крови (прежде всего, свертываемости).* Турбулентность обуславливает появление шумов, что позволяет осуществлять медицинскую диагностику звуковыми методами (см. раздел 3).

* <http://fb.ru/article/200074/sostav-krovi-i-funktsii-krovi-cheloveka> – Огромная библиотека информативных цветных изображений, отражающих состав и свойства крови, можно найти в поисковых системах по ключевой фразе «где в потоке крови находятся эритроциты и плазма».

2.3.2. Уравнение неразрывности струи при протекании крови в сосудах человека

Течение крови зависит как от физического свойства крови, так и от свойств и состояния кровеносных сосудов. Кровеносная система человека^{*} – это сложная замкнутая система эластичных трубок разного диаметра. В нее входят: аорта, артерии, артериолы, капилляры, венулы, вены. Из сердца кровь поступает в аорту, из нее распределяется по артериям, затем по артериолам и далее расходится по миллионам мелких капилляров. По венам кровь возвращается в сердце. Отметим, что основа теории кровообращения была заложена еще К. Галеном, который впервые выдвинул предположение о существовании двух кругов кровообращения^{**}.

На рис. 2.6 приведена общая схема системы кровообращения человека, а на рис. 2.7 – система кровообращения с указанием функционального назначения ее звеньев^{***}.

Длительность цикла кровообращения (большой и малый круги кровообращения) у человека составляет приблизительно 20 с. Малый круг кровообращения: правое предсердие – правый желудочек – легочный ствол – легкие (здесь кровь насыщается кислородом) – левое предсердие. Выброс крови из левого желудочка (ударный объем) – начало большого круга кровообращения: левый желудочек – аорта – артерии – капилляры органов всего тела – капиллярно-венозные анасто-

^{*} Основная функция кровеносной системы – транспорт кислорода и выведение продуктов метаболизма (обмена веществ) и, как следствие: поддержание постоянной температуры тела и постоянного состава тела (гомеостаза), иммунитета.

^{**} Клавдий Гален (греч. Γαληνός; 129 или 131 год – около 200 или 217 года – римский (греческого происхождения) медик, хирург и философ. Создал первую теорию кровообращения, просуществовавшую до 1628 года, когда Уильям Гарвей опубликовал свой труд «Анатомическое исследование о движении сердца и крови у животных». Гален внёс существенный вклад в понимание анатомии, физиологии, патологии, фармакологии, неврологии, философии и логики.

^{***} Разнообразные схемы системы кровообращения с описаниями представлены во всех поисковых системах Интернета.

мозы. Здесь кровь входит в венозную систему и далее через полые вены (верхнюю и нижнюю) попадает в правое предсердие. Следует отметить, что в малом круге по артериям течёт венозная кровь, а по венам – артериальная.

В течение суток поток крови совершает порядка 4200 циклов, т.е. за сутки сердце перегоняет по всем сосудам до 10 000 литров крови! Скорость кровотока в разных сосудах различна. Основные параметры потока крови в различных кровеносных сосудах человека приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Динамические характеристики потока крови в сосудах человека [46]

Сосуды	Диаметр, мм	Скорость, 10^{-2} м/с	Давление, мм. рт. ст.
Аорта	20	30 – 50	50 – 150
Артерии	20 – 5	20 – 50	80 – 20
Артериолы	0,1 – 0,5	1 – 20	50 – 20
Капилляры	0,5 – 0,01	0,01 – 0,05	20 – 10
Венулы	0,1 – 0,2	0,1 – 1,0	10 – 5
Вены	10 – 30	10 – 20	(-5) – (+5)

Приведенные в таблице 2.1 параметры дают лишь общее представление о гидродинамических характеристиках сосудов человека. Разброс величин, приводимых в различных источниках, достаточно велик. Это вполне объяснимо, поскольку даже для одного и того же человека они зависят от суточных фаз жизнедеятельности. Одни параметры получены из экспериментальных данных, другие – на основе теоретических расчетов. Обсуждение этих специальных вопросов выходит далеко за пределы данного курса. Материалы достаточно полно представлены в поисковых системах Интернета (ключевые слова «Характеристика движения крови по сосудам», «Гидродина-

мические характеристики сосудистого русла» и т.д.). Отметим лишь тот факт, что эти данные не всегда сопоставимы, поскольку далеко не всегда совпадают выделенные элементы сосудистого русла и не всегда они одинаково обозначаются. Что касается данных, приведенных в табл. 2.1. то в ней приведены в каком-то смысле собирательные характеристики для группы фрагментов сосудистого русла, выполняющих одни и те же функции. Приводимые величины скорости частиц крови и давления – суть средние по сечению значения в данном типе сосудистого русла.

На первый взгляд, кажется, что приведенные значения противоречат уравнению неразрывности струи (2.5) – в тонких капиллярах скорость кровотока примерно в 1000 меньше, чем в артериях. Однако это несоответствие кажущееся. Дело в том, что в табл. 2.1 приведен диаметр *одного* сосуда. Эта величина действительно уменьшается по мере разветвления. Однако суммарная площадь разветвления возрастает. Так, суммарная площадь сечения всех капилляров (около 2000 см^2) в сотни раз превышает площадь сечения аорты – этим и объясняется такая малая скорость крови в капиллярах. Малая скорость кровотока в капиллярах обеспечивает эффективный обмен между кровью и тканями.

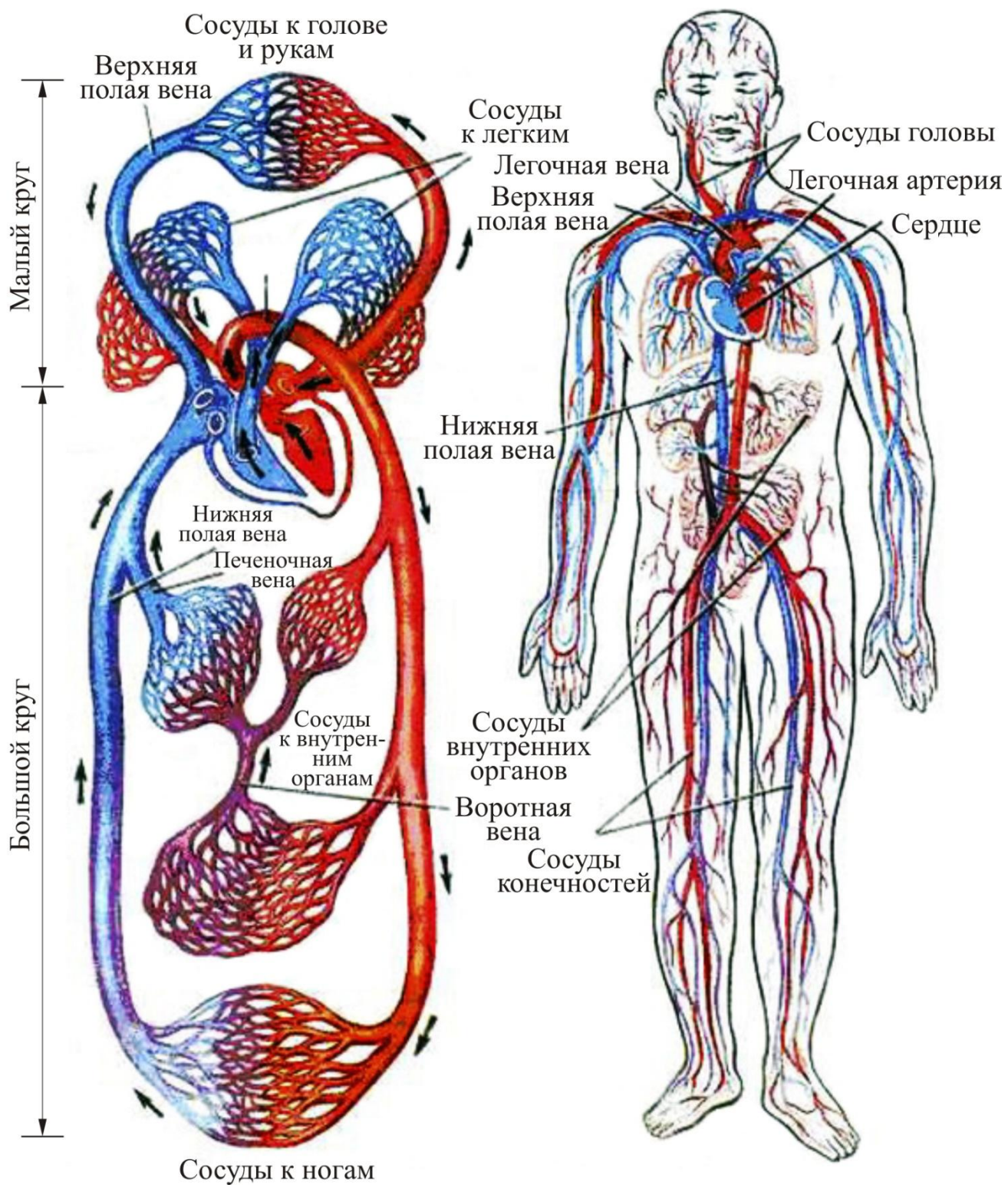


Рис. 2.6. Общая схема системы кровообращения человека*

* Многочисленные изображения, представленные в Интернете, можно легко найти по ключевым словам «Системы кровообращения», «Атлас физиологии человека»

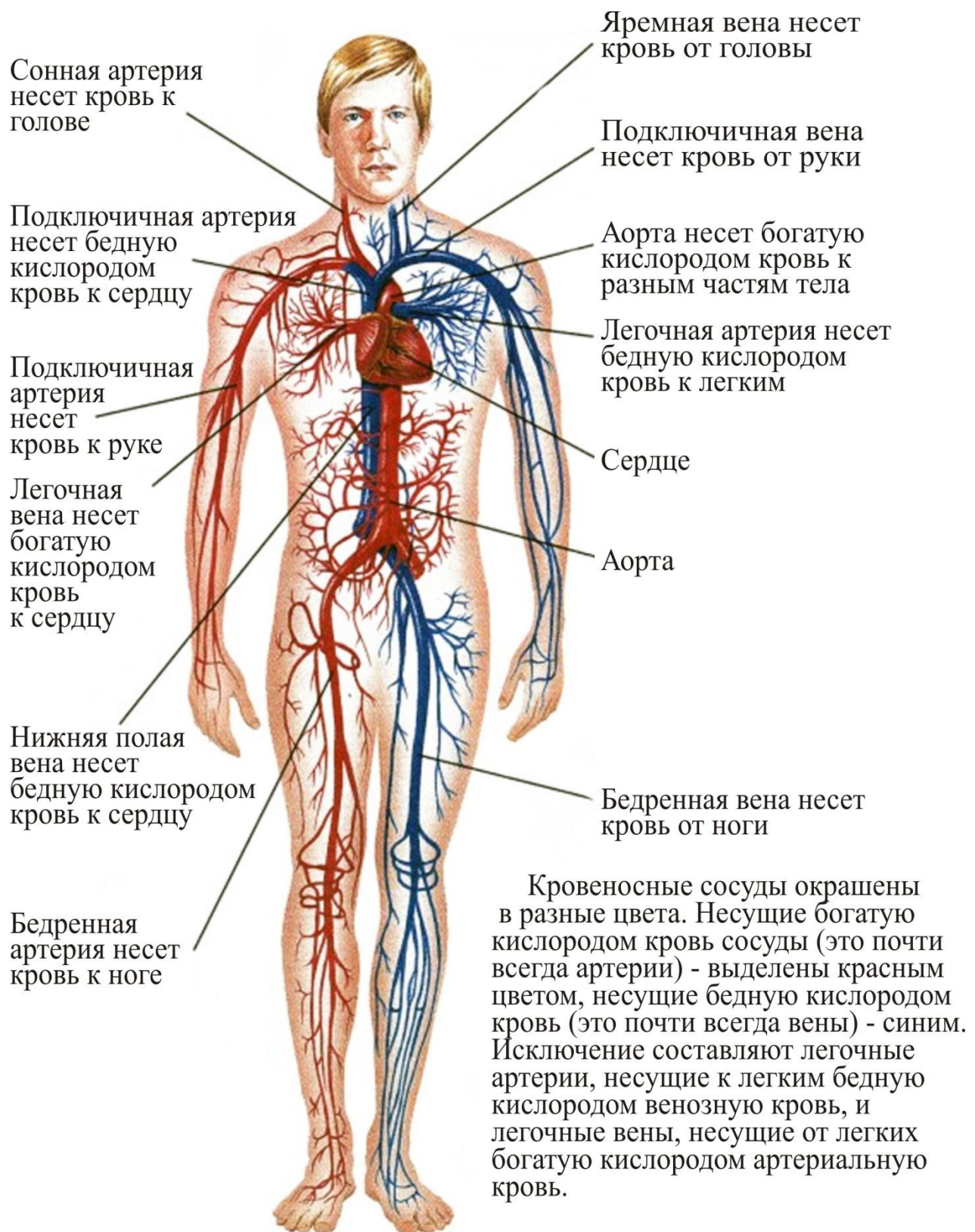


Рис 2.7. Система кровообращения человека (см. подпись к рис. 2.6).
Приведено функциональное назначение звеньев кровеносной системы

2.3.3. Работа сердца. Пульсовая волна

Для поддержания движения жидкости в замкнутой гидродинамической системе требуется «насос», который создает разность давлений, обеспечивающую преодоление гидравлического сопротивления. В системе кровообращения роль такого «насоса» играет сердце. Внешний вид его представлен на рис. 2.8; на рис.2.9 приведена проводящая система сердца и на рис. 2.10 – анатомическое строение в разрезе.

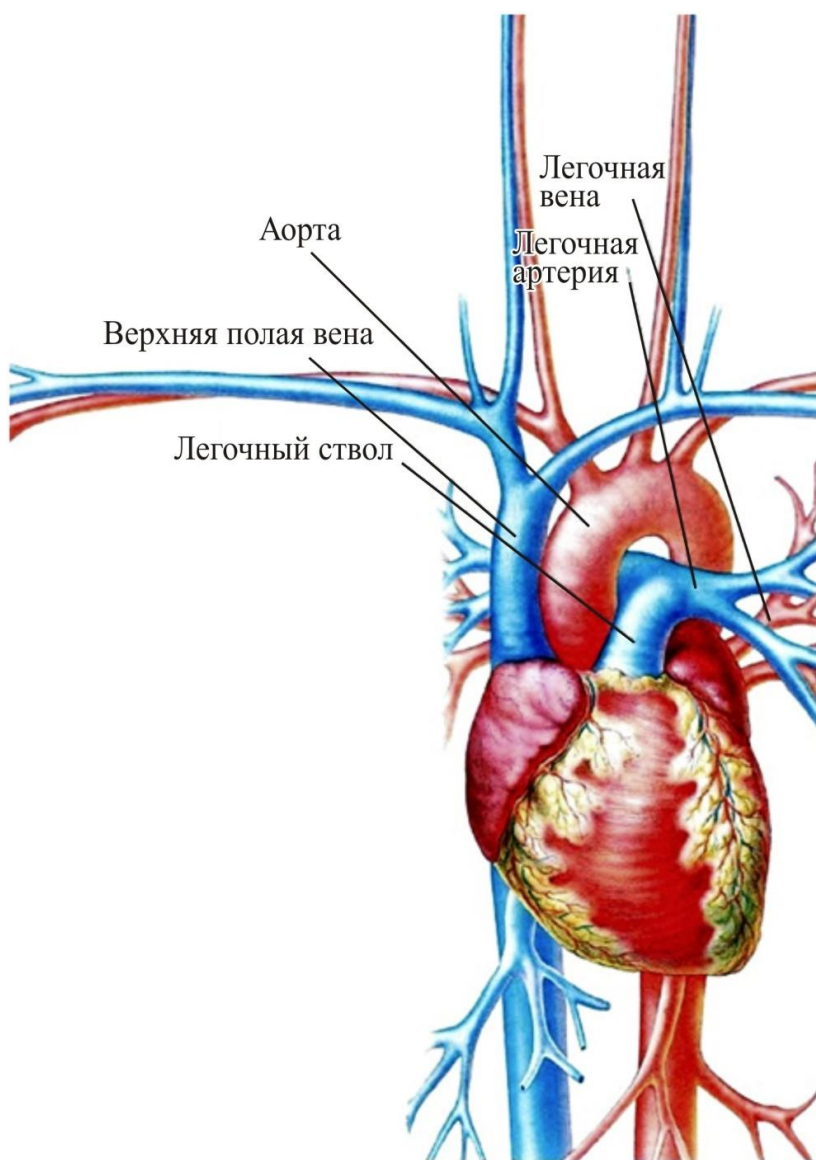


Рис. 2.8. Внешний вид сердца*

* По ключевым словам «строение сердца» в поисковых системах Интернета можно найти до 5 тыс. изображений сердца. Там же в свободном доступе различные издания «Атласа физиологии человека» на электронных носителях.

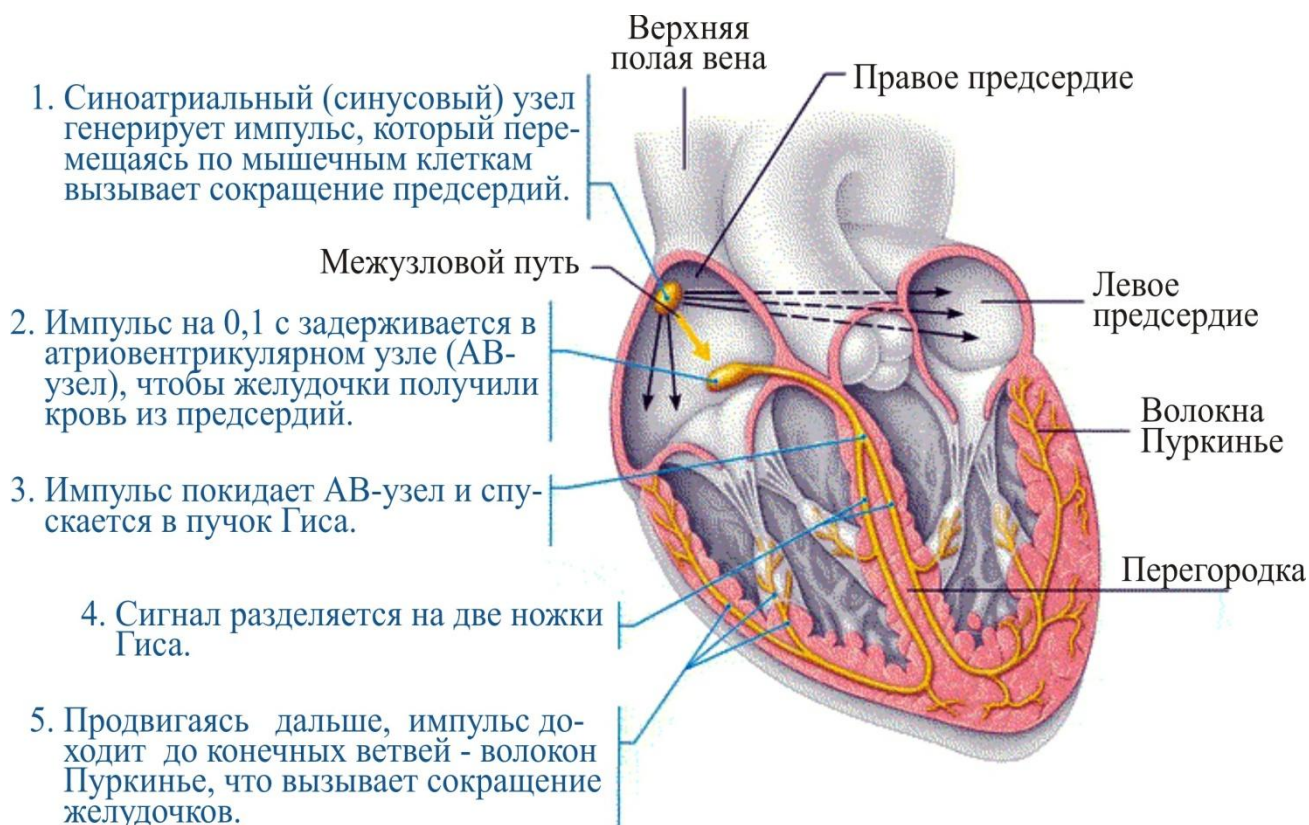


Рис 2.9. Проводящая система сердца (фронтальный срез) человека

Детальное рассмотрение работы сердца выходит за пределы данного пособия. Отметим только основные функции сердца [6а]:

- автоматизм, способность специализированных клеток миокарда^{*} вырабатывать электрические импульсы, вызывающие возбуждение миокарда (в норме наибольшим автоматизмом обладают клетки синусового узла^{**}, расположенного в правом предсердии);
- проводимость, способность проводить электрические импульсы от автоматических клеток до сократительного миокарда;
- возбудимость, способность сердца возбуждаться под влиянием элек-

* Миокард (лат. myocardium от др.-греч. μῦς «мышца» и καρδιά «сердце») – название мышечного среднего слоя сердца, составляющего основную часть его массы.

** SA (СУ) – термин, образовавшийся из двух понятий: sinus – «пазуха», полость и atrium (лат.) – предсердие и.

трических импульсов (этой функцией обладают клетки проводящей системы и сократительного миокарда); во время возбуждения возникает электрический ток;

–сократимость, способность сердца сокращаться под воздействием этих электрических импульсов.

Функция сердца – сократимость, собственно и является предметом изучения в разделе «Механика». «Насос», обеспечивающий сокращение сердечных мышц, «включается» под воздействием электрических импульсов.

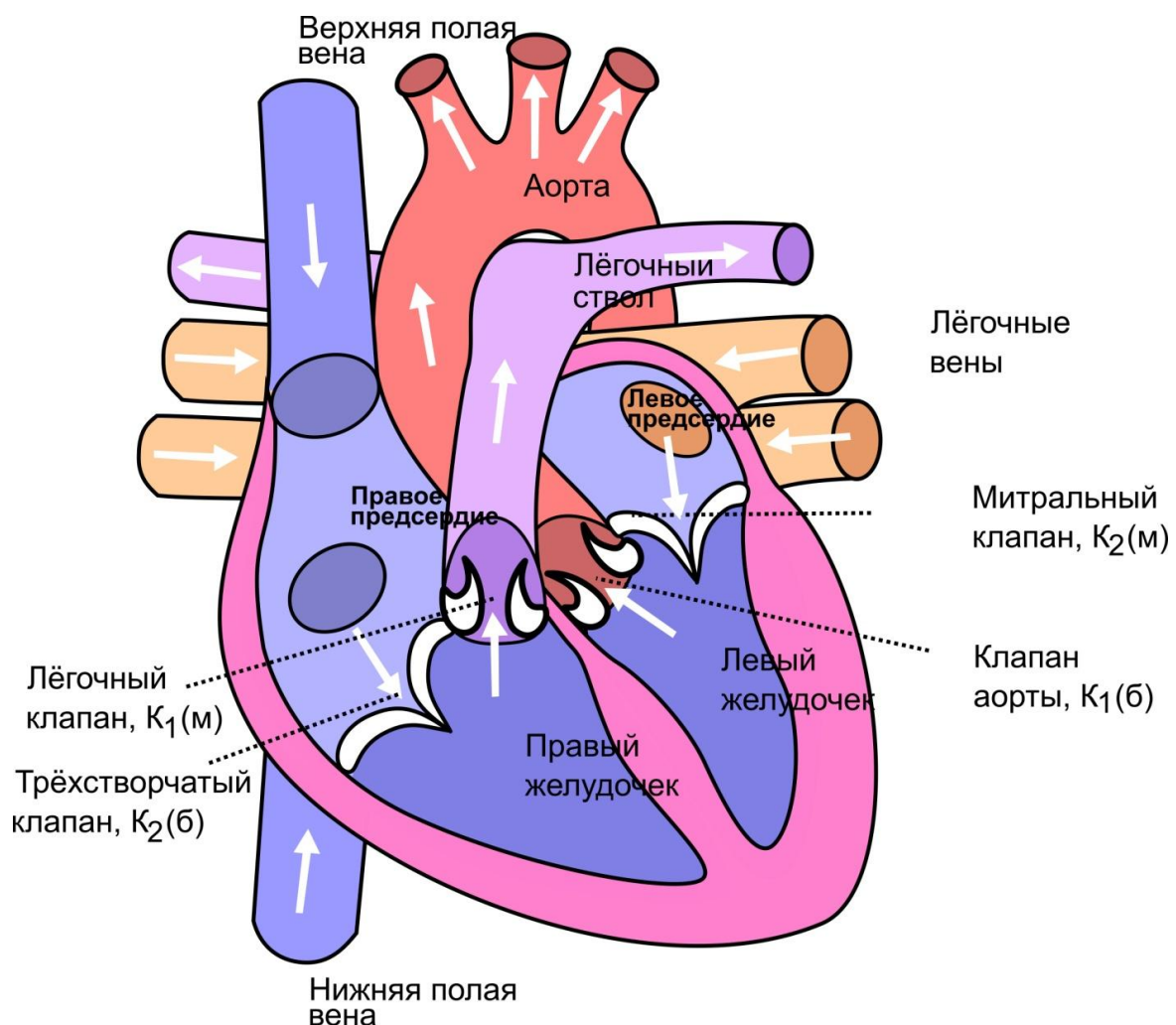


Рис. 2.10. Анатомическое строение сердца (фронтальный срез):

$K_1(б)$, $K_2(б)$, $K_1(м)$, $K_2(м)$ – обозначения клапанов
как в механической модели сердца на рис. 2.12 а, б.

(в оригинале они отсутствуют)

Как видно на рис. 2.9, проводящая система через атриовентрикулярный узел охватывает оба предсердия, мышцы желудочков, управляя их напряжением и расслаблением посредством электрических импульсов, генерируемых в синоатриальном узле. Таким образом, синусовый узел выступает как задающий генератор электрических импульсов (60–80 импульсов в мин.). Поэтому различные фазы работы относительно четко регистрируются посредством измерения разности потенциалов электрического поля, возникающих на коже человека. Это открытие принадлежит В. Эйнтховену* (Нидерланды) и лежит в основе широкого распространения методики диагностики сердца – ЭКГ (электрокардиографии). В России первую электрокардиограмму пациента записал профессор Казанского Императорского университета А.Ф. Самойлов в 1908 г.

Рассмотрим схематически механические явления, происходящие в большом круге кровообращения.

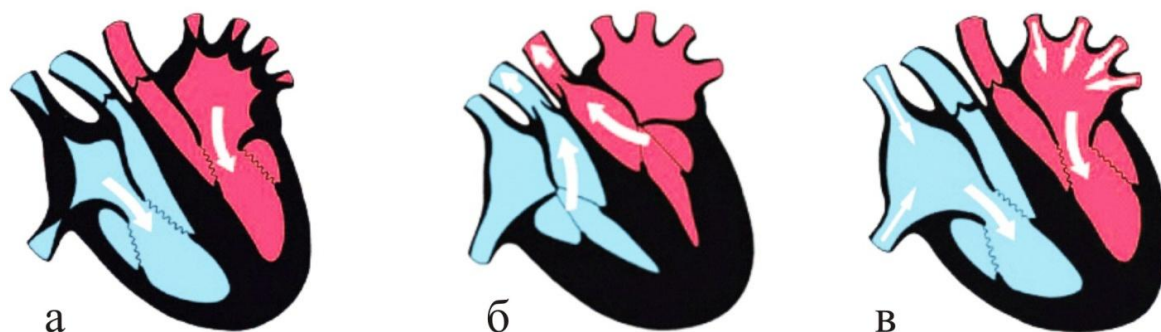


Рис. 2.11. Фазы сердечного цикла: а) – систола предсердий, б) – систола желудочков, в) – диастола желудочков**

* Виллем Эйнтховен (нидерл. *Willem Einthoven*; 21 мая 1860, Семаранг – 29 сентября 1927, Лейден) – нидерландский физиолог, основоположник электрокардиографии, сконструировал в 1903 году прибор для регистрации электрической активности сердца, впервые в 1906 году использовал электрокардиографию в диагностических целях, получил Нобелевскую премию по физиологии и медицине в 1924 году.

** Рисунок заимствован из Интернета. Ключевое слово для поиска – «Сердечный цикл».

Работа сердца схематически представлена на рис. 2.11 и состоит в последовательном сокращении сердечной мышцы и расслаблении с короткими промежутками для отдыха. В одном сердечном цикле можно выделить три основные фазы. Во время первой фазы (рис. 2.11а), которая у взрослого человека длится примерно 0,1 с, сокращаются синхронно оба предсердия (кровь «перекачивается» в желудочки), а желудочки к этому времени находятся в расслабленном состоянии (диастола). Предсердие начинает работать спустя некоторое время ($0,05 \div 0,1$ с) после возбуждения синусового узла (начала электрического импульса). Сокращение предсердий начинается с места впадения в него вен, что гарантирует первичное сжатие их устьев и невозможность крови вылиться обратно в вены. За ней следует вторая фаза (рис. 2.11б) – *систола* (от лат. *sustolē* – *сжатие*), в данном случае сокращение желудочков) (она также порядка 0.1 с). Желудочки синхронно сокращаются (работают как нагнетающий насос) и выталкивают кровь в аорту через левый желудочек и в лёгочную артерию через правый желудочек; предсердия в это время расслаблены и клапаны, отделяющие предсердия от желудочков (трёхстворчатый и митральный) закрываются. Далее наступает третья, заключительная фаза (рис. 2.11в) – *диастола* (от лат *diastole* – *расслабление*), пауза, во время которой происходит общее расслабление сердца (в желудочках крови нет). Ее продолжительность порядка 0,4 с. В это время входит и длительность деполяризации (реполяризации в терминах электрокардиографии) миокарда желудочков. За это время предсердия, частично и желудочки, через открытые клапаны, наполняются кровью. Таким образом, весь сердечный цикл – длительность механических сердечных сокращений (или от импульса до импульса) длится до 1 с. Обратная ей величина называется частотой сердечных сокращений – ЧСС. В течение одного сердечного цикла предсердия работают при-

мерно $10 \div 12,5$ % от полного времени сердечного цикла, а желудочки $30 \div 37,5$ %. Время собственного сокращения предсердий с атриовентрикулярной проводимостью и сокращением желудочков занимает примерно 0,3 с. Сердце, как механический насос, проталкивающий кровь в кровеносную систему, работает примерно треть времени общей продолжительности цикла. В остальное время «насос» отключается.

Поток крови из предсердий регулируется системой клапанов (рис. 2.10), предотвращающих обратный ток крови (*регургитацию*) из желудочков и обеспечивающих синхронность потока в малом и большом круге кровообращения для одновременного наполнения обоих желудочков (соблюдение условия «неразрывности струи»).

Следует отметить, что при размеренной работе сердца времени расслабления (диастолы) хватает на то, чтобы наполнить желудочки кровью. Однако при учащении работы сердца, например, при больших нагрузках, систола предсердий приобретает решающее значение – без неё желудочки просто не успели бы наполниться кровью. Выброс крови в аорту и далее по артериям осуществляется только при сокращении левого желудочка, именно эти сокращения называются пульсом. Как известно, значения пульса человека весьма индивидуальны и зависят у одного и того же человека от ряда факторов. Поэтому приведенные выше временные интервалы, характеризующие различные фазы работы сердца, достаточно условны. В рассмотренной выше схеме длительность сердечного цикла принята за 1 с. Это соответствует пульсу 60 ударов в минуту. Эта величина использована при дальнейшем обсуждении работы сердца как механического насоса, активная фаза которого в совокупности занимает 3 с. (Нормой считается дли-

тельность сердечного цикла 0,85 с, что соответствует среднему значению пульса $70 \div 72$ удара в минуту)*.

На рис. 2.12а приведена упрощённая схема большого и малого кругов кровообращения. Механическую модель сердечно-сосудистой системы (ССС) можно представить в виде замкнутой, заполненной жидкостью системы из множества разветвленных трубок с эластичными (и пластичными в системе вен) стенками (рис. 2.12б). Движение жидкости происходит под действием ритмично работающего насоса в виде груши с двумя клапанами.

При сжатии груши (в схеме большого круга это сокращение левого желудочка) открывается выпускной клапан $K_1(б)$ (имитирующий клапан аорты) и содержащаяся в ней жидкость (кровь) выталкивается в трубку А (аорта). После этого клапан $K_1(б)$ закрывается. Благодаря растяжению стенок объем трубки увеличивается, и она вмещает избыток жидкости. Стенки аорты начинают постепенно сокращаться, прогоняя избыток жидкости в следующее звено системы (артерии). Их стенки сначала также растягиваются, принимая избыток жидкости, а затем сокращаются, проталкивая жидкость в последующие звенья системы. На завершающей стадии цикла кровообращения жидкость (кровь) собирается в трубку Б (верхняя и нижняя полые вены) и через впускной клапан $K_2(б)$ (*трехстворчатый клапан*) (см. рис. 2.10) из правого предсердия кровь поступает в правый желудочек.

* Общая продолжительность сердечного цикла может быть значительно больше и ее увеличение связывают с увеличением длительности третьей фазы – диастолы. Пульс более 80 ударов в минуту считается патологией (тахикардия), ведущей к укорочению продолжительности жизни, ниже 40 – также патологией (брадикардия), требующая соответствующей коррекции, например, установки кардиостимулятора. Частота сердечных сокращений у животных сильно различается от вида к виду: у слонов, например, – порядка 30 (живут $60 \div 70$ лет), а у крыс – 300 ударов в минуту (по разным источникам живут $2 \div 3$ года), у землероек $300 \div 600$ (не доживают и до 2-х лет).

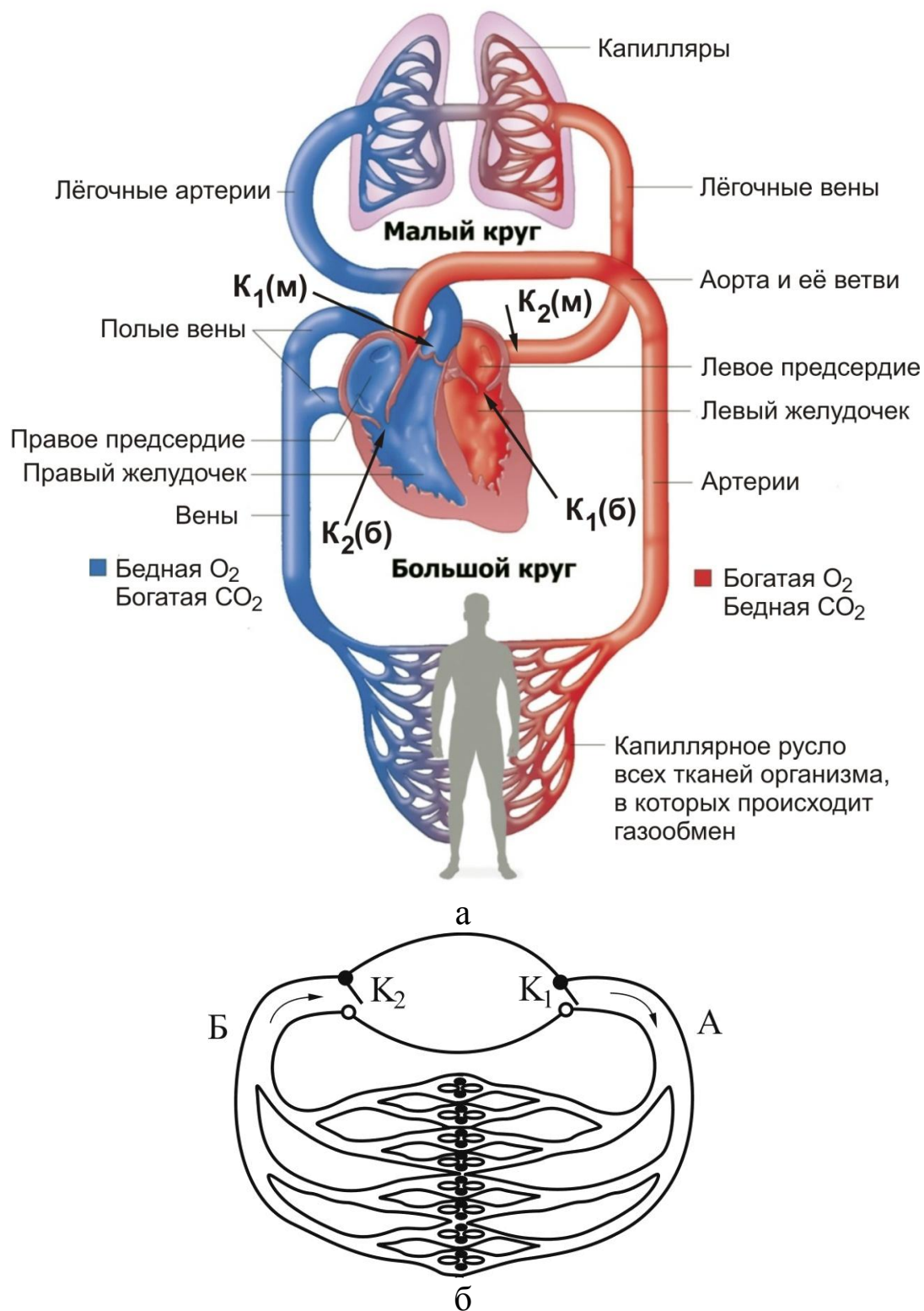


Рис. 2.12. а) – Упрощённая схема большого и малого кругов кровообращения*; б) – механическая модель кровообращения (комментарии в тексте)

* Верхний рисунок, заимствованный в Интернете, дополнен обозначением мест расположения клапанов сердца для согласованности с текстом.

Как механическая система сердце представляет собой ритмически работающий насос, у которого рабочие фазы – систолы чередуются с холостыми фазами – диастолами. В течение систолы кровь, содержащаяся в левом желудочке, выталкивается в аорту, после чего клапан аорты закрывается. Объем крови, который выталкивается в аорту при одном сокращении сердца, называется *ударным объемом* ($60 \div 70$ мл). Поступившая в аорту кровь растягивает ее стенки, и давление в аорте повышается. Это давление называется *систолическим* (Систолическое Артериальное Давление – САД, p_c). Повышенное давление распространяется вдоль артериальной части сосудистой системы. Такое распространение обусловлено упругостью стенок артерий и называется *пульсовой волной*.

Пульсовая волна – распространяющаяся по аорте и артериям волна повышенного (над атмосферным) давления. Вызвана она выбросом крови из левого желудочка в период систолы. Пульсовую волну математически можно представить в виде совокупности гармонических волн. Однако с достаточно высокой степенью приближения можно ограничиться учетом доминирующей первой гармоники. И тогда пульсовую волну можно описать уравнением гармонической затухающей бегущей продольной волны (см. раздел 3, уравнение 3.21, рис. 3.11). Здесь круговая частота соответствует частоте сокращений сердечной мышцы (ЧСС): $60 \div 80$ в мин. ($1 \div 1,3$ Гц или $6,28 \div 8,16$ рад·с⁻¹, $\omega = 2\pi\nu$). Встречая на своем пути сопротивление среды (в данном случае гидродинамическое), любая волна затухает, если возмущение среды прекращается. Но сердце работает непрерывно. Поэтому по мере продвижения потока крови от центра к периферии амплитуда пульсаций лишь убывает. Пульсовая волна распространяется со скоростью v_n , значение которой находится в интервале $5 \div 10$ м/с. Величина скорости в крупных сосудах зависит от их размеров и механических свойств ткани стенок:

$$v_n = \sqrt{Eh/\rho d}, \quad (2.9)$$

где E – модуль упругости, h – толщина стенки сосуда, d – диаметр сосуда, ρ – плотность вещества сосуда. Профиль артерии в различные фазы волны схематически показан на рис. 2.13.

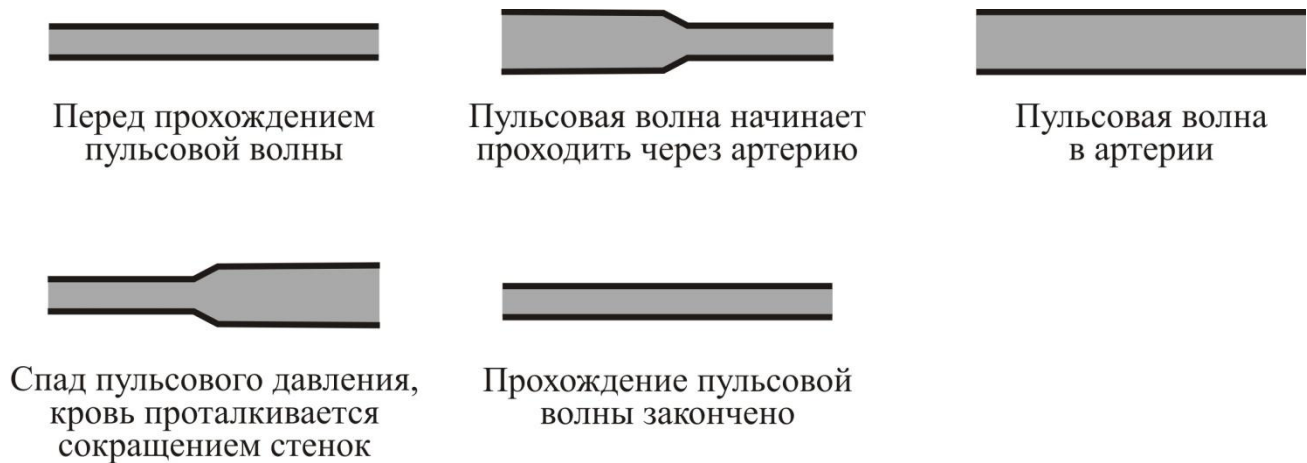


Рис. 2.13. Профиль артерии при прохождении пульсовой волны

После прохождения пульсовой волны давление в соответствующей артерии падает до величины, которую называют *диастолическим давлением* (Диастолическое Артериальное Давление – ДАД, p_d).

Таким образом, изменение давления в крупных сосудах носит пульсирующий характер. Это четко проявляется на сонной артерии и на периферии, например, лучевой артерии. На рисунке 2.14 схематически показаны два цикла изменения давления крови в плечевой артерии.

Пульсовой волне соответствует пульсирование скорости кровотока. В крупных артериях скорость составляет $0,3 \div 0,5$ м/с. Однако по мере разветвления сосудистой системы сосуды становятся тоньше и их гидравлическое сопротивление растет пропорционально R^4 . Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний давления. В артериолах и далее колебания давления практически отсутствуют. По мере разветвления падает не только амплитуда колебаний давления, но и его среднее значение. Характер распределения давления в различных участках сосу-

дистой системы имеет вид, представленный на рис. 2.15. Здесь показано превышение давления над атмосферным давлением.

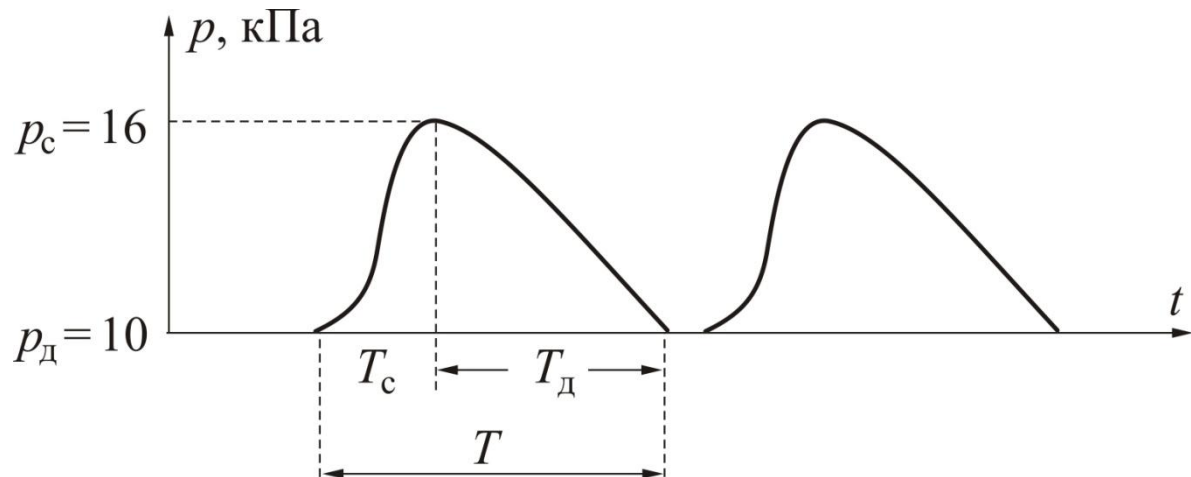


Рис. 2.14. Схематическое представление изменения артериального давления в плечевой артерии: T — длительность сердечного цикла; $T_c \approx 0,3T$ — длительность систолы; $T_d \approx 0,7T$ — длительность диастолы; p_c — максимальное значение САД; p_d — минимальное значение ДАД.

См. комментарии по тексту

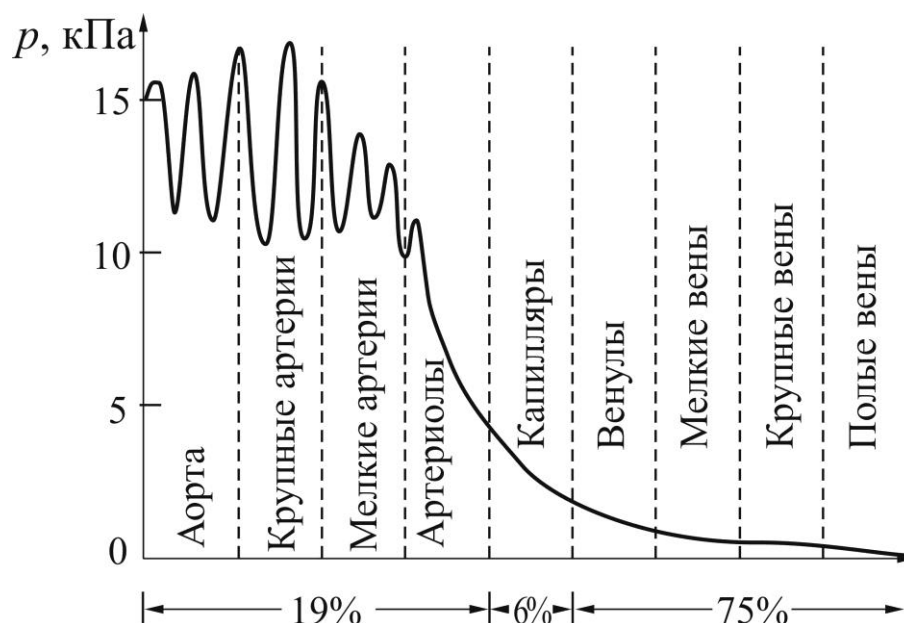


Рис. 2.15. Распределение давления в различных участках сосудистой системы человека. На оси абсцисс приведены относительные доли общего объема крови на данном участке

Сечения сосудов кровеносной системы в течение суток испытывают периодические изменения. Это связано с тем, что протяженность сосудов очень велика (100000 км) и 7÷8 литров крови, содержащихся в кровеносных сосудах, для их максимального заполнения явно недостаточно. Поэтому наиболее интенсивно снабжаются те органы, которые в данный момент работают с максимальной нагрузкой. Сечение остальных сосудов в этот момент уменьшается. Так, например, после приема пищи наиболее энергично функционируют органы пищеварения, к ним и направляется значительная часть крови; для нормальной работы головного мозга ее не хватает, и человек испытывает сонливость.

Несколько слов об энергетических характеристиках работы сердца. В течение одной систолы левый желудочек выбрасывает в аорту ударный объем крови (60÷70 мл). На такую же величину уменьшается и объем желудочка: $\Delta V \approx 65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Полезная работа, совершенная сердечной мышцей за одно сокращение, может быть оценена по формуле: $\Delta A = p_{\text{ср}} \Delta V_{\text{уд}}$, где $\Delta V_{\text{уд}}$ – среднее значение ударного объема крови, а $p_{\text{ср}}$ – среднее давление, которое создается внутри желудочка. Оно немного выше систолического давления в артерии: $p_{\text{ср}} \approx 17 \text{ кПа}$. Отсюда получаем оценку для работы сердечной мышцы за одно сокращение: $\Delta A \approx 17 \cdot 10^3 \times 65 \cdot 10^{-6} = 1,1 \text{ Дж}$. Полезная мощность, развиваемая сердечной мышцей во время систолы, $N_{\text{с}} = \Delta A / T_{\text{с}}$, где $T_{\text{с}} \approx 0,3 \text{ с}$ – длительность систолы. Отсюда получаем: $N_{\text{с}} = 1,1 / 0,3 = 3,7 \text{ Вт}$. В среднем для здорового человека в спокойном состоянии время одного цикла сердечной деятельности $T \approx 0,85 \text{ с}$. Средняя мощность за весь цикл равна $N_{\text{ср}} = 1,1 / 0,85 = 1,3 \text{ Вт}$. При гипертонии артериальное давление повышается и соответственно увеличивается работа, совершаемая сердцем. *В течение жизни сердце успевает совершить работу, достаточную для поднятия груженого железнодорожного состава на высочайшую вершину в цепи Альпийских гор – Монблан (высота 4810 м, Италия – Франция).*

Отметим, что сердечная деятельность обнаруживается в различных физических явлениях, которые и определяют способы ее регистрации и диагностики:

- Электрические – ЭКГ, *вентрикулокардиография*.
- Звуковые – *аускультация, фонокардиография*.
- Механические:
 - верхушечный толчок – *пальпация, апекскардиография*;
 - пульсовая волна – *пальпация, сфигмография, флебография*;
 - динамические эффекты – изменение центра тяжести грудной клетки в сердечном цикле – *динамокардиография*;
 - баллистические эффекты – сотрясание тела в момент выброса крови из сердца – *баллистокардиография*;
 - изменение размеров, положения и формы – УЗИ, *рентгенокимография*.

Их детальное рассмотрение выходит за пределы данного пособия. Частично они представлены в последующих разделах.

2.3.4. Физические основы клинического метода измерения давления крови

В медицине широко используется аускультативный (*auscultatio* – лат. – выслушивание, (см. раздел 3.2.4)) метод измерения артериального давления (АД) (Н.С. Коротков, 1905 г., Россия). Типичный прибор для определения давления (сфигмоманометр или тонометр) состоит из окклюзионной (окклюзия – *occlusion* – лат. – запирание, скрывание) пневмоманжеты, груши для нагнетания воздуха с регулируемым клапаном для стравливания воздуха и устройства, измеряющего давление в манжете. В качестве подобного устройства используются ртутные манометры, стрелочные манометры aneroidного типа или электронные манометры. Аускультация производится стетоскопом либо мембранным фонендоскопом (см. раздел 3.2.4). При этом чувствительную головку располагают у нижнего края манжеты над проекцией плечевой артерии без значительного давления на кожу.

Принцип работы прибора состоит в следующем. Вокруг руки между плечом и локтевым суставом (выше примерно на 2 см) накладывают

манжету, в которую накачивают воздух. Как только давление в манжете превысит давление крови в плечевой артерии, кровоток прекращается. При стравливании воздуха из манжеты кровоток возобновляется сначала частично, а потом полностью. По манометру фиксируют величины давления, при котором начинается и заканчивается восстановление кровотока. САД определяют при декомпрессии манжеты в момент появления первых тонов, а ДАД – по моменту их исчезновения. Аускультативная методика признана ВОЗ как эталон неинвазивного определения АД. (*Invasion* – лат.; инвазия – одно из значений – вмешательство, в данном случае в организм) несмотря на несколько заниженные значения для САД и завышенные для ДАД по сравнению с величинами, полученными при инвазивном измерении (путем введения в артерию пациента зонда с гидрофоном для контроля уровня давления). Манжету накладывают всегда в области плечевой артерии (рис. 2.16).

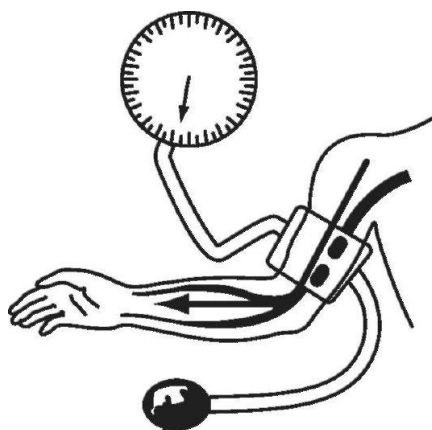


Рис. 2.16. Схема наложения манжеты: она всегда накладывается на уровне сердца: пациент сидит или лежит, но иногда возникает необходимость определять давление и в положении «стоя»

Такой выбор места для наложения манжеты позволяет стандартизировать результаты, так как плечевая артерия в опущенной руке находится на уровне сердца и измеряемое давление совпадает с давлением крови в ближайшей к сердцу части аорты. Если бы давление изме-

рялось, например, на щиколотке, то результат измерения зависел бы от роста человека и его положения (вертикальное, горизонтальное, сидя).

Рассмотрим физические основы этого метода. Схема процессов, последовательно проявляющихся при измерении давления, представлена на рис. 2.17.

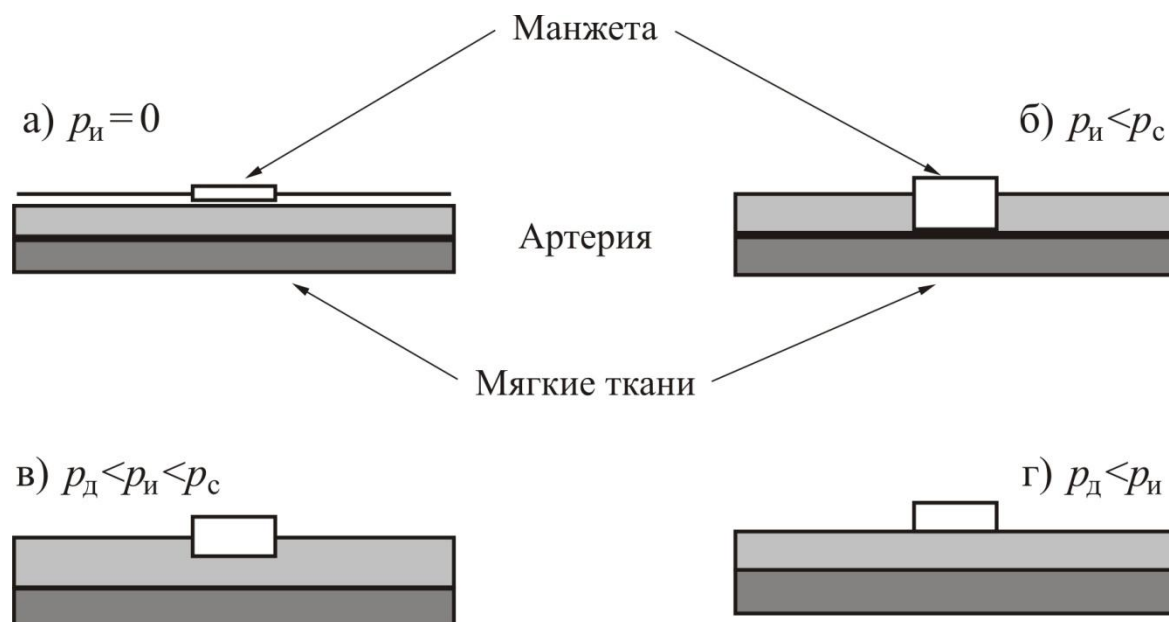


Рис. 2.17. Схема измерения давления крови

1. Сначала избыточное давление $p_{и}$ воздуха в манжете отсутствует, и кровоток не прерывается.

2. По мере закачивания воздуха в манжету она сдавливает плечевую артерию; когда давление в манжете превысит систолическое давление ($P_{с}$), кровоток прекращается.

3. Медленно стравливая (выпуская) воздух, уменьшают давление в манжете. После того как давление в манжете станет чуть меньше систолического давления ($p_{д} < p_{и} < p_{с}$), кровь начнет проталкиваться через сдавленную артерию. В ней создается поток, сопровождающийся шумами, которые хорошо прослушиваются через фонендоскоп. Эти шумы обусловлены вибрацией стенок артерии непосредственно за манжетой под действием толчков от порций крови, которые прорываются сквозь сжатый манжетой участок сосуда. В момент появления шума

по манометру регистрируется систолическое давление («верхнее давление»). По времени шум как результат перехода потока крови из ламинарного в турбулентное появляется после сдавливания, т.е. оно занижено по определению.

4. Когда давление в манжете становится меньше диастолического давления p_d , манжета перестаёт пережимать артерию. Кровоток из режима турбулентности переходит в режим ламинарного течения и шумы, связанные с вихрями, прекращаются. В момент прекращения шумов по манометру регистрируется диастолическое давление («нижнее давление»), но исчезновение шума предшествует регистрации нижнего давления, т.е. показывает завышенное значение. Итак, описанный метод имеет тенденцию *занижать* «верхнее давление» и *завышать* «нижнее давление», рис. 2.18.

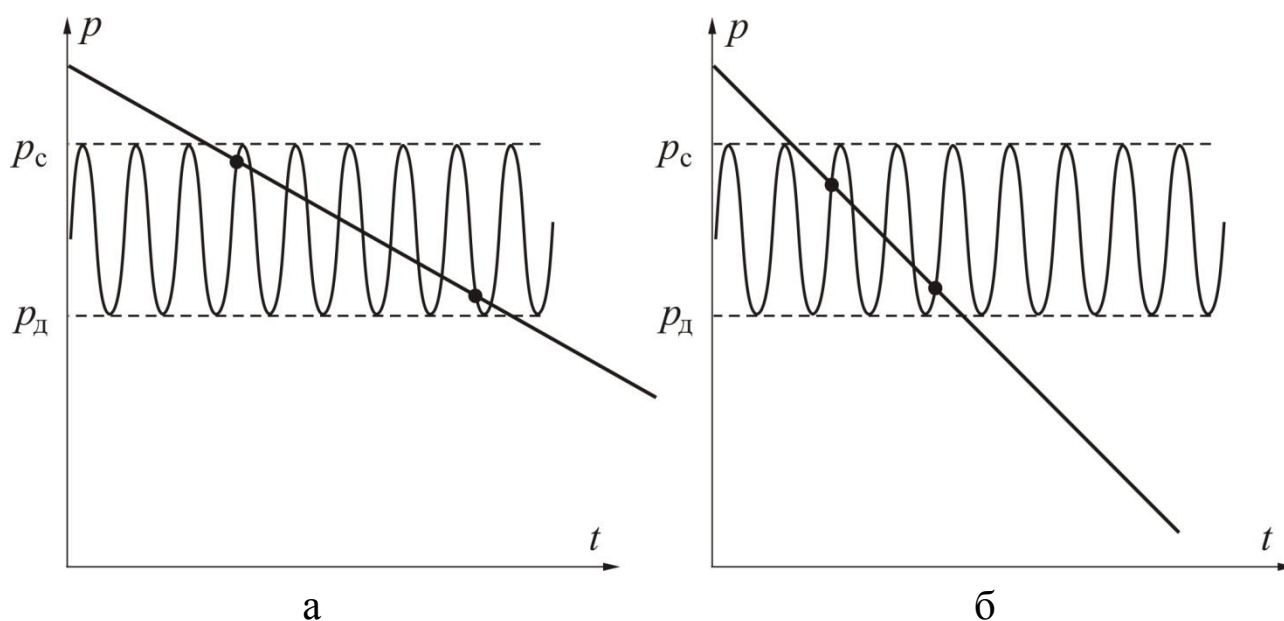


Рис. 2.18. Погрешности, возникающие при измерении артериального давления: а) – при медленном стравливании воздуха из манжеты, б) – при быстром стравливании воздуха из манжеты (пояснения в тексте)

Прямой линией показано изменение давления в манжете. «Синусоида» показывает характер изменения артериального давления.

«Верхнее» и «нижнее» давления, фиксируемые по показаниям манометра, отмечены жирными точками. Видно, что при быстром «сравливании» давления в манжете погрешности становятся больше (математически – чем больше «синусоид» попадает в интервал измерений, тем выше точность измерения). Поэтому рекомендуется медленное сравливание давления в манжете в ходе измерения – через интервалы 2 мм рт. ст.

Для измерения АД используют различные типы приборов: ручной, полуавтоматический или автоматический [6в].

2.3.5. Артериальное давление и эластичность сосудов

Измерение артериального давления обязательно при прохождении обследования у любого врача. В норме в течение каждого сердечного цикла артериальное давление меняется от 16 кПа (120 мм рт. ст.) до 10 кПа (80 мм рт. ст.) Эти числа показывают, насколько давление крови в артерии выше атмосферного давления. Величина артериального давления определяется, в основном, следующими факторами: – силой, с которой кровь во время систолы выталкивается в сосудистое русло; – эластичностью стенок сосудов; – сопротивлением сосудистого русла, зависящим от величины просвета сосудов и вязкости крови.

Уровень артериального давления изменяется при мышечной нагрузке, эмоциональных напряжениях, при изменениях функционального состояния или при воздействии ряда физических факторов (звук высокой интенсивности, ультразвук, инфразвук, вибрация, перегрузки и т.д.). Повышенное артериальное давление может быть истинным – при гипертонической болезни, или симптоматическим – при других заболеваниях. Величина кровяного давления также изменяется при заболеваниях, связанных с нарушением нервной регуляции просвета сосудов. В одних случаях имеет место увеличение давления до 220/120 мм рт. ст. (гипертония), в других – давление снижается ниже нормы до величины 90/60 мм рт. ст. (гипотония). При повышенном значении АД

нагрузка на стенки сосудов возрастает, что чревато их разрывами, приводящими к внутренним кровоизлияниям. При пониженном значении возникают проблемы с кровоснабжением головного мозга. Это обусловлено уменьшением гидростатического давления с ростом высоты (см. раздел 2, формула 2.3). У человека в вертикальном положении это уменьшение достигает 5 кПа (38 мм рт. ст.). Чрезмерное снижение *внешнего* давления представляет серьезную опасность для организма (см. раздел 4.3). С возрастом, в связи с развитием склеротических изменений, сосуды теряют эластичность, становятся жесткими, что существенно отражается на деятельности сердечно-сосудистой системы. Пульсовые колебания кровотока возрастают, эффективность работы сердца снижается, а нагрузка на него растет. Кроме того, наличие склеротических изменений в сосудах значительно меняет скорость кровотока и, следовательно, питание тканей. Это следует из формулы Пуазейля, согласно которой объем жидкости (газа), протекающий в единицу времени t через длинную трубку (объемная скорость), равен

$$Q = \pi r^4 \Delta p / 8 l \eta, \quad (2.10)$$

где r – радиус трубки; l – ее длина; Δp – разность давления на концах трубки; η – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения) жидкости. Увеличение вязкости приводит к уменьшению скорости потока, т.е. объема протекающей жидкости.

При этом существенно меняются различные регуляторные воздействия. Так, вместо расширения, сосуды зачастую надолго суживаются, что ведет к снижению кровоснабжения (объем кровотока пропорционален четвертой степени радиуса просвета сосуда). Это приводит к ухудшению функций мозга, сердца и других органов. В области склеротических изменений имеет место не только сужение просвета сосуда, но и возникновение турбулентности потока крови, что может сопровождаться изменением реологического свойства крови с последующими осложнениями для состояния здоровья.

На рис. 2.19 приведены некоторые виды возможных нарушений нормального кровотока в кровеносных сосудах человека. Пример возможного нарушения сосудистой стенки в области бифуркации приведен на рис. 2.20.

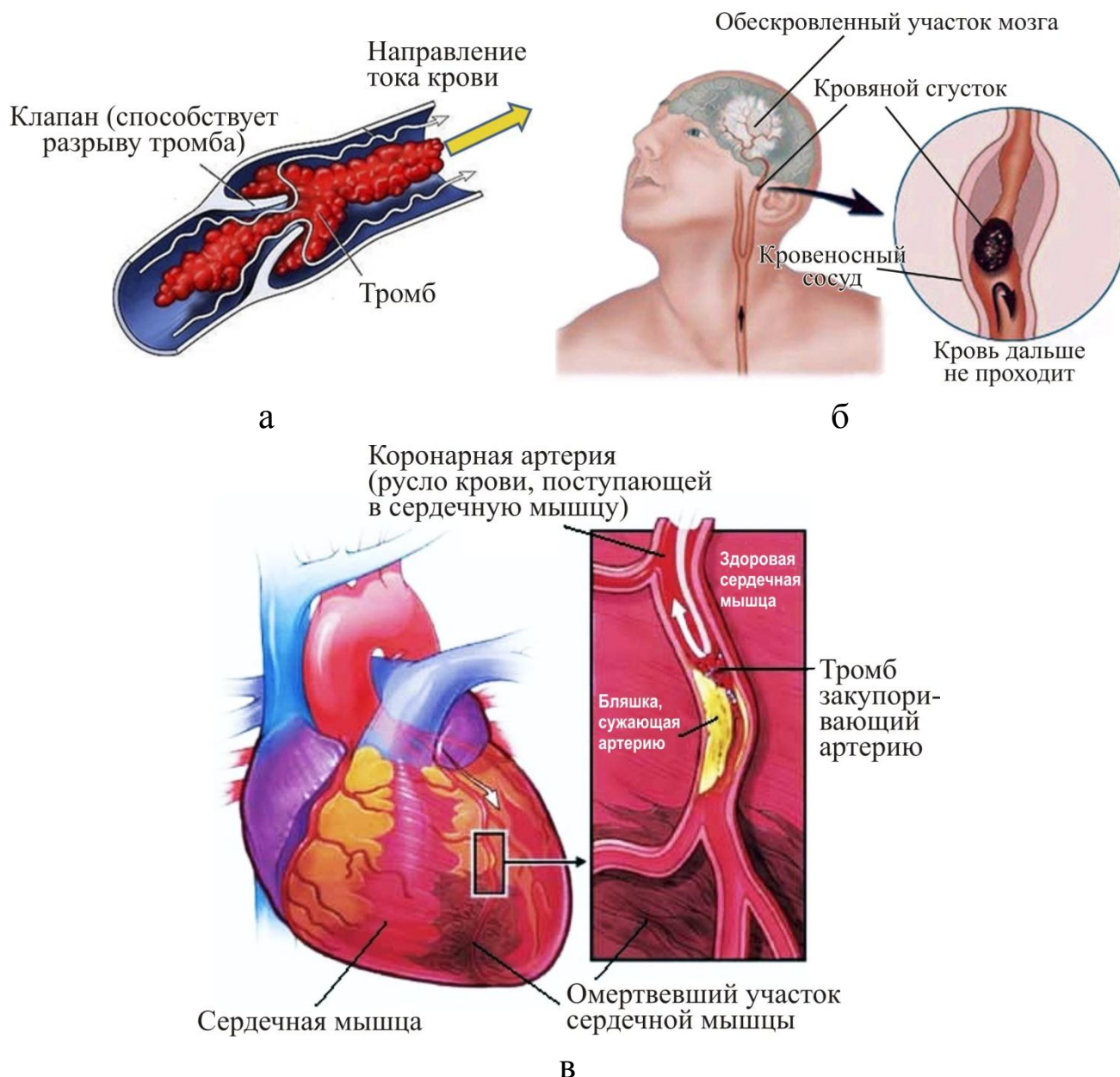


Рис. 2.19. Примеры возможных последствий изменения потоков крови в кровеносных сосудах человека (иллюстрации взяты из различных интернет-источников)

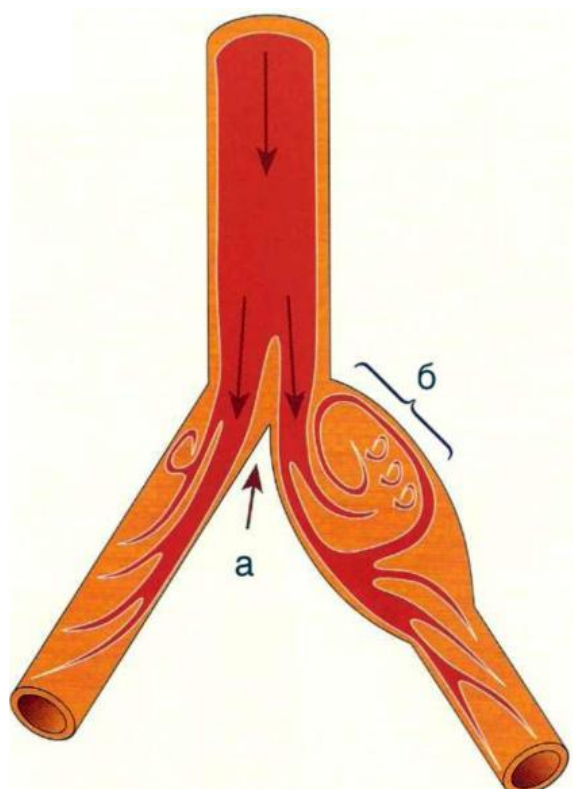


Рис. 2.20. Распределение внутрисосудистого давления крови на участке бифуркации артерии, где поток крови разделяется на два русла: в зоне (а) сосудистая стенка испытывает наибольшее давление и создаётся максимальное напряжение сдвига; вблизи противоположной стенки сосуда (б) создаётся завихрение потока, скорость движения потока крови снижается, напряжение сдвига минимальное [6б]

РАЗДЕЛ 3. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Звук – физическое явление, представляющее собой распространение в виде упругих волн механических колебаний частиц твёрдой, жидкой или газообразной среды. В узком смысле под звуком имеют в виду колебания в контексте с тем, как они воспринимаются органами чувств животных и человека^{*}. Звук характеризуется амплитудой и частотой (спектром частот). Обычный человек способен слышать звуковые колебания в диапазоне частот от $16 \div 20$ Гц до $15 \div 20$ кГц. Звук ниже диапазона слышимости человека называют *инфразвуком*; выше: до 1 ГГц, – *ультразвуком*, от 1 ГГц – *гиперзвуком*. Обычно для генерации звука применяются колеблющиеся тела различной природы, вызывающие периодические изменения давления упругой среды, например воздуха. Примером такой генерации могут служить колебания диффузора громкоговорителя, камертона, голосовых связок (голосовых складок^{**}), элементов большинства музыкальных инструментов. Исключением являются духовые инструменты, в которых звук генерируется за счёт взаимодействия потока воздуха с неоднородностями в инструменте. Прежде чем перейти к звуковым волнам, рассмотрим основные характеристики колебательных процессов (колебаний) на примере гармонических колебаний.

^{*} Существует несколько определений звука. Но все они сводятся к одному – к распространению и восприятию механических колебаний частиц упругой среды – упругих волн.

^{**} Голосовые складки – это складки слизистой оболочки гортани, выступающие в её полости, содержащую голосовую связку и голосовую мышцу. Спектр создаваемых ими звуковых волн индивидуален и может служить идентификационным признаком человека, как и папиллярные линии на пальцах руки, используемые в дактилоскопии.

3.1. Гармонические колебания

Колебаниями или колебательными процессами называют движения системы, характеризующиеся повторяемостью (периодичностью) прохождения ею положения равновесия. В механике простейшей колебательной системой является маятник. Один из таких маятников (одна из модельных систем) – пружинный маятник, изображен на рис. 3.1. Грузик массой m может скользить без трения по стержню, проходящему симметрично сквозь грузик, связанный с пружиной, массой которой можно пренебречь. Будучи выведенным из положения равновесия (точка «О» на оси x), грузик будет периодически проходить через это положение равновесия.

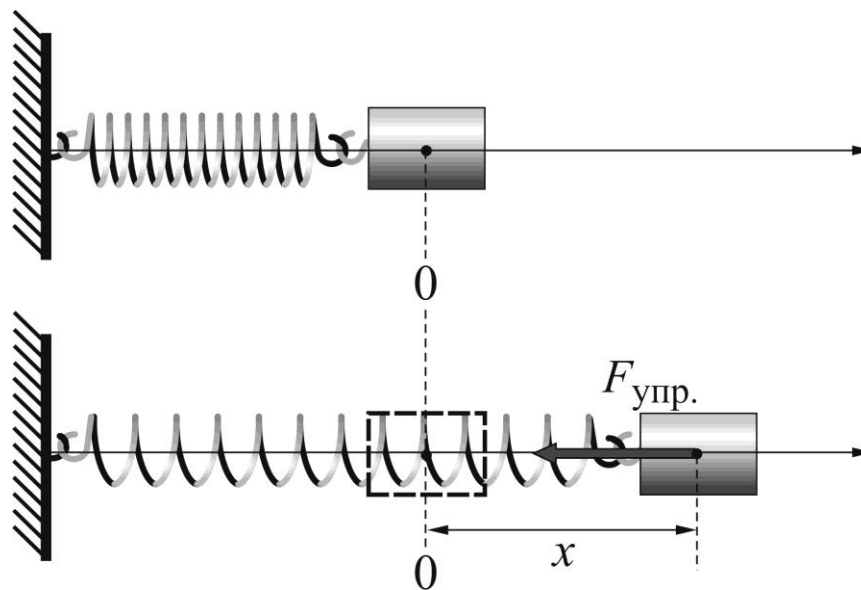


Рис. 3.1. Схематическое изображение пружинного маятника

Согласно закону Гука (Раздел 1.3.1) в пружине возникают упругие силы $F_{\text{упр.}}$, пропорциональные смещению x : $F_{\text{упр.}} = -kx$. Уравнение движения тела(грузика) записывается в виде уравнения (3.1) или (3.1a):

$$m\ddot{x} = -kx \quad (3.1)$$

или

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3.1a)$$

где $\omega_0^2 = k/m$, $\ddot{x} = d^2x/dt^2 = a$.

Частным решением уравнения (3.1a) является гармоническая функция:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3.2)$$

или

$$x = A \sin\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.2a)$$

где x – смещение точки от положения равновесия, t – время, A – амплитуда, ω_0 – собственная круговая (угловая, циклическая) частота, φ_0 – начальная фаза колебаний, $(\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебаний в момент времени t . Собственная круговая частота колебаний связана с частотой ν_0 и периодом колебаний T соотношениями $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ или $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$. На рис. 3.2a представлен график косинусоидальной функции с произвольной начальной фазой φ_0 . С изменением начала отсчета времени будет меняться и величина начальной фазы φ_0 . Примем ее за «0», и тогда график косинусоидальной функции сместится вдоль оси времени к началу отчета (рис. 3.2б) на величину t_1 .

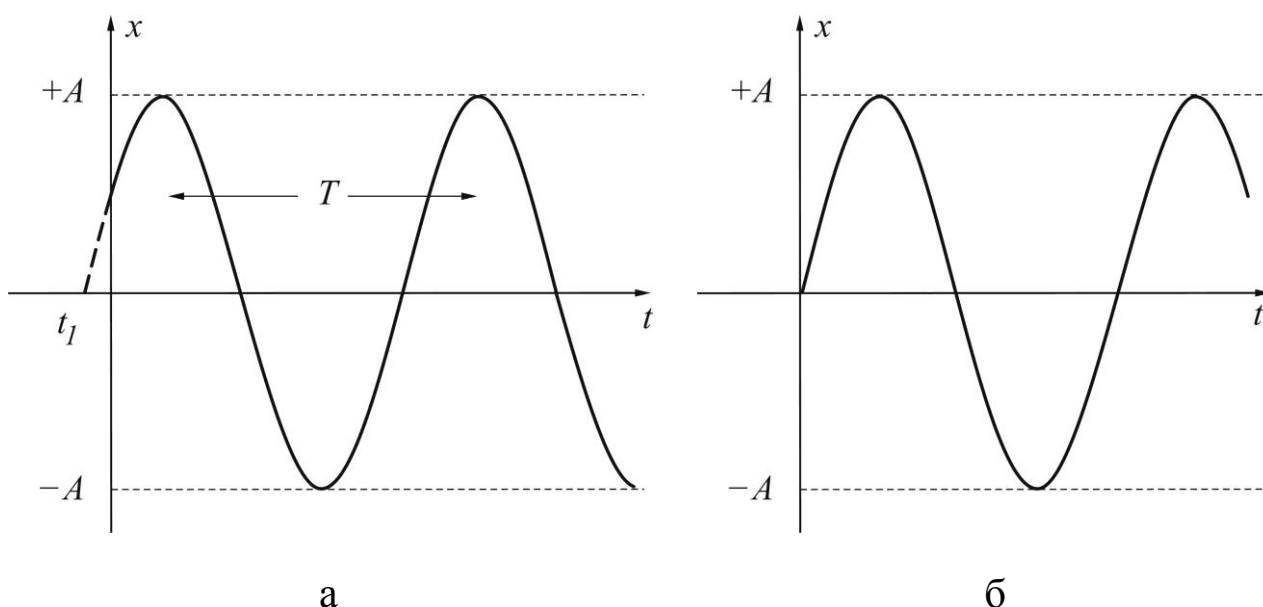


Рис. 3.2. График косинусоидальной функции: а) – с произвольной начальной фазой, б) – с нулевой начальной фазой

Гармоническое колебание можно представить как вращение некоторого вектора $\mathbf{A}$ с угловой скоростью ω_0 (рис. 3.3).

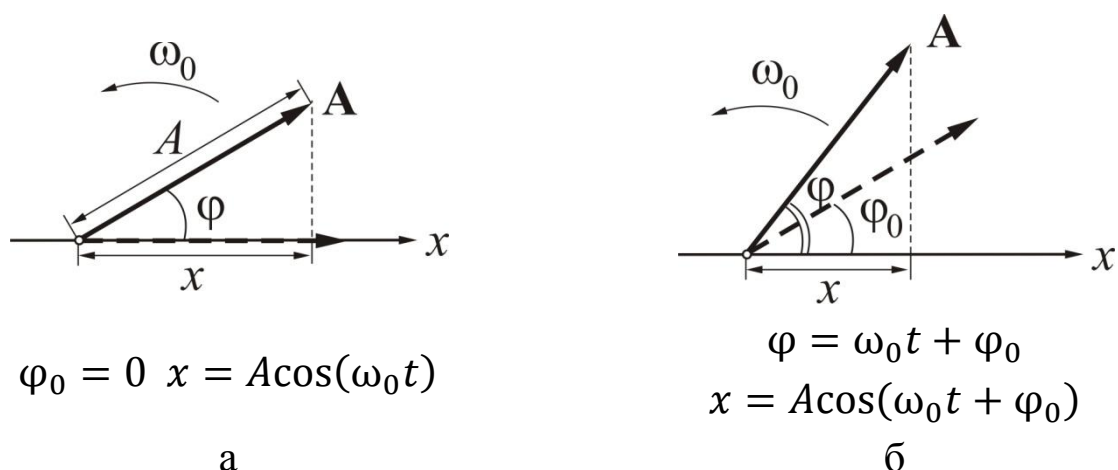


Рис. 3.3. Векторная модель гармонических колебаний: а) – колебания с начальной фазой, равной 0; б) – с начальной фазой φ_0

Полный оборот вектора $\mathbf{A}$ равен 2π и соответствует одному периоду колебаний T . Проекция его на ось X определяется уравнением (3.2). Если вращение начинается из горизонтального положения (про-

екция вектора $\mathbf{A}$ равна его модулю A), то принимают, что начальная фаза равна 0, а если из положения под наклоном к оси X , то величину угла наклона φ_0 принимают за начальную фазу колебаний. Этому углу и соответствует время, обозначенное на рис. 3.2а как t_1 ($t_1 < T$). В угловой мере начальная фаза определяется величиной $2\pi \cdot (t_1/T)$, ($2\pi = 360^\circ$). В любом ином положении – это фаза колебаний в данный момент времени. Таким образом, фаза – это угловая мера отклонения частицы от положения равновесия.

3.1.1. Затухающие колебания

При наличии силы трения (сопротивления) дифференциальное уравнение затухающих гармонических колебаний получается добавлением члена $r\dot{x}$ в уравнение свободных гармонических колебаний (3.3)

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x} \quad (3.3)$$

или

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3.3a)$$

где r – коэффициент сопротивления; β – коэффициент затухания [$\beta = r/(2m)$], ω_0 – собственная круговая (угловая, циклическая) частота ($\omega_0 = \sqrt{k/m}$). При записи уравнений (3.3) и (3.3а) принято, что при малых скоростях перемещения тела (частицы) сила сопротивления пропорциональна первой степени скорости – закон Стокса. Очевидно, это предположение выполняется при малых отклонениях от положения равновесия, при которых получено решение уравнения для незатухающих колебаний (3.2).

Решением уравнения (3.3) является гармоническая функция

$$x = A(t) \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.4)$$

где амплитуда колебаний $A(t)$ спадает по экспоненциальному закону (A_0 – амплитуда в момент $t = 0$) согласно соотношению

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \quad (3.5)$$

а циклическая частота ω и фаза φ зависят от коэффициента затухания β :

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (3.6)$$

График затухающих гармонических колебаний представлен на рис. 3.4.

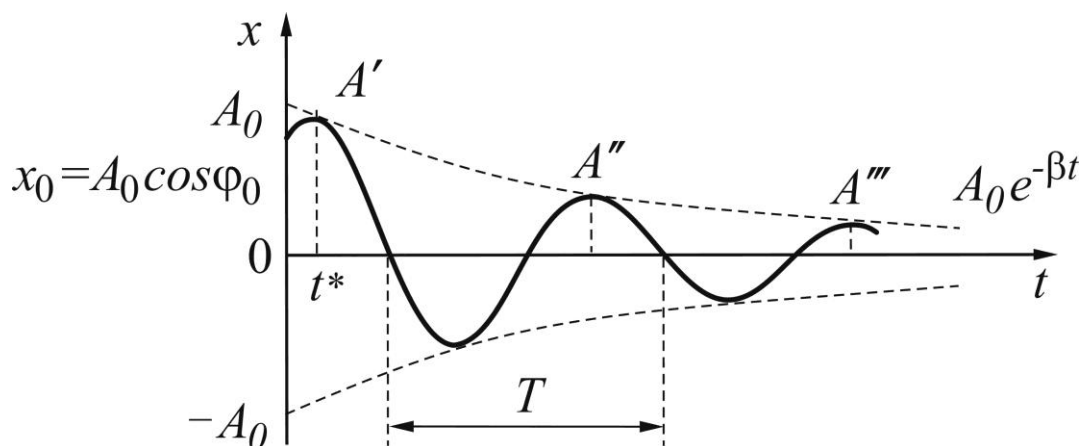


Рис. 3.4. Схематическое представление затухающих гармонических колебаний

Для количественной оценки степени затухания используют величину, называемую логарифмическим декрементом затухания колебаний:

$$\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T, \quad (3.7)$$

где $A(t)$ и $A(t + T)$ – амплитуды двух последовательных колебаний, отстоящих по времени друг от друга на один период.

3.1.2. Вынужденные колебания

При воздействии на систему периодически изменяющейся силой $F_0 \cos \omega t$ уравнение движения записывается в следующем виде:

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x} + F_0 \cos \omega t \quad \text{или} \quad \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t, \quad (3.8)$$

где $f_0 = F_0/m$.

На рис. 3.5а представлены вынужденные колебания (решение уравнения 3.8) в графическом виде: это также гармонические колебания (гармоническая функция), но с частотой ω , амплитуда которой (огнивающая этой функции $A \cos \omega t$ изображена пунктиром) зависит от частоты собственных колебаний ω_0 и сил трения, (сопротивления), характеризуемых параметром β .

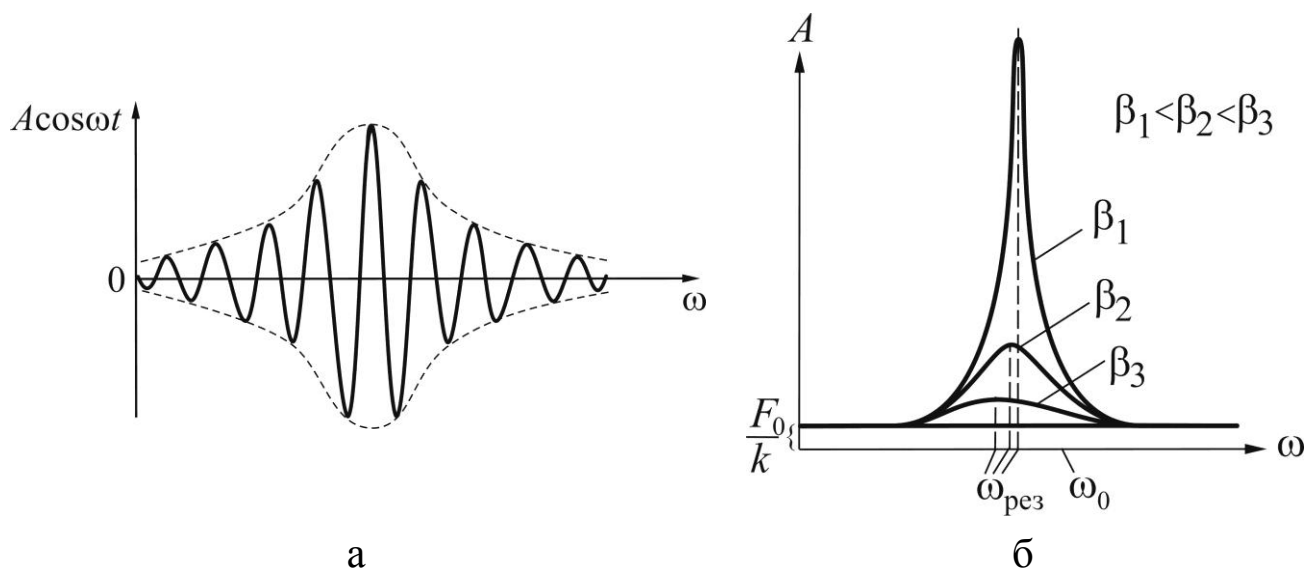


Рис. 3.5. а) – Графическое представление вынужденных колебаний при прохождении условия механического резонанса; б) – зависимость амплитуды и частоты механического резонанса от сопротивления среды

На частоте $\omega_{\text{рез}}$, близкой к частоте собственных колебаний, а именно, при условии:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (3.9)$$

происходит резкое увеличение амплитуды колебаний. Как видно на рис. 3.5б, при увеличении сопротивления среды резонансная частота уменьшается, уменьшается также и амплитуда колебаний.

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0/m}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (3.9a)$$

Ряд явлений, связанных с наложением колебаний, будут рассмотрены при описании вопросов, связанных с волновыми процессами.

3.2. Звуковые волны (звук)

3.2.1. Плоская продольная гармоническая волна

Колебание частиц среды связано с нарушением равновесного состояния системы, и выражается в отклонении её характеристик от равновесных значений с последующим возвращением к исходному значению. Для звуковых колебаний такой характеристикой является давление в точке среды, а её отклонение от равновесного значения – *звуковым давлением*.

Если произвести резкое смещение частиц упругой среды в некоторой области среды, то в этой области увеличится плотность. Уплотнение приведет к увеличению сил межмолекулярного отталкивания, и, следовательно, давления. Как было показано в разделе 2.1, благодаря упругим связям между частицами смещаются соседние частицы и т.д. Таким образом, область повышенного давления как бы перемещается

в упругой среде. За областью повышенного давления (сжатия вещества) следует область пониженного давления (разрежения вещества), и, таким образом, образуется ряд чередующихся областей сжатия и разрежения, распространяющихся в среде в виде волны. Каждая частица упругой среды в этом случае будет совершать колебательные движения.

Поскольку в жидких и газообразных средах имеют место только деформации сжатия (разрежения), то звуковые (акустические) волны представляют собой продольные волны, в которых направление колебания частиц среды совпадает с направлением перемещения волны. В твёрдых телах, помимо продольных деформаций, возникают упругие деформации сдвига как следствие возникновения сдвиговых напряжений, обуславливающие возбуждение поперечных (сдвиговых) волн; в этом случае частицы совершают колебания перпендикулярно направлению распространения волны. Скорость распространения продольных волн значительно больше скорости распространения поперечных волн.

Рассмотрим простейший тип волнового процесса – продольную плоскую гармоническую волну, в которой частицы среды совершают колебания по гармоническому закону: $\cos(\omega_0 t)$ или $\sin(\omega_0 t)$ (см. уравнения 3.2 и 3.2а, начальная фаза принята равной 0).

Представим себе, что в произвольной точке пространства локальное возмущение среды привело к колебанию частиц в этой области, которое легко описать гармонической функцией, и распространяется оно вдоль оси x в изотропной среде без потери энергии колебаний (модельный случай). Это возбуждение будет передаваться от одной точки среды к другой бесконечно долго. Отклонение колеблющихся точек среды должно описываться функцией $\xi(x, t)$, зависящей как от времени, так и от координаты области среды x , до которой дошло возмущение (для сохранения единообразия при описании волновых процессов используем такое обозначение для направления распространения волны вдоль оси x). Для описания распространения волны в про-

извольном направлении зачастую используется радиус-вектор $\mathbf{r}$. Графически плоская продольная гармоническая волна представлена на рис. 3.6а. Расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе, называют длиной волны λ . Поскольку возбуждение от одной точки среды до другой передается с некоторой скоростью v за время полного колебания частицы T , то получаем важное соотношение между этими тремя характеристиками волны: $\lambda = vT$. Уравнение волны можно получить следующим способом.

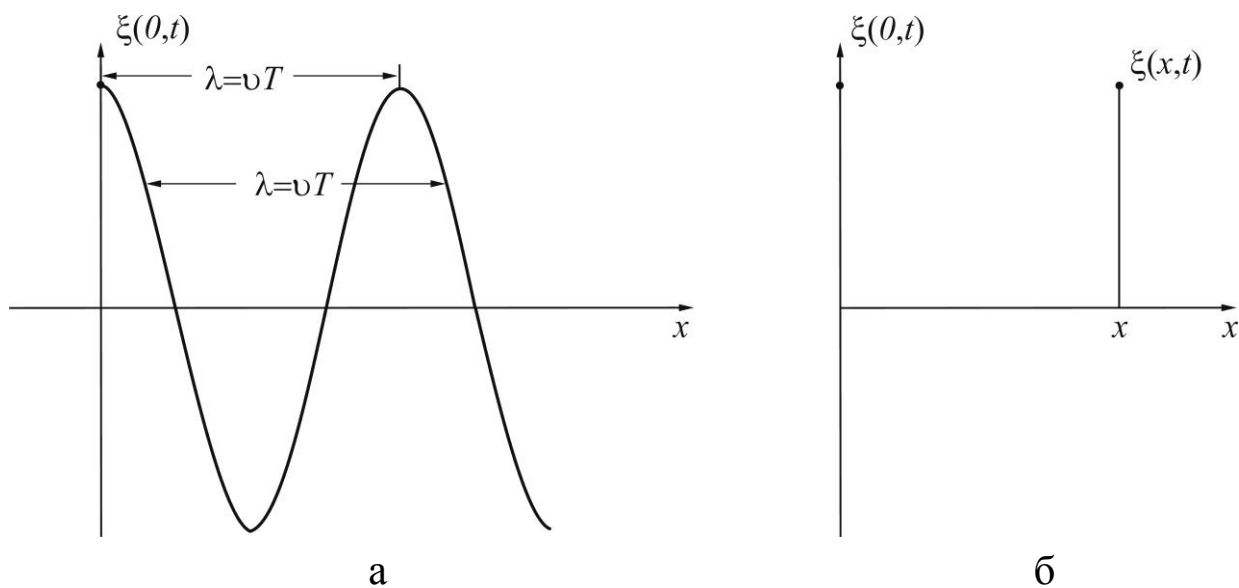


Рис. 3.6. Графическое представление косинусоидальной продольной плоской волны

Пусть в начале координат (рис. 3.6а) было возбуждено колебание, описываемое функцией $\xi(0, t) = A \cos(\omega_0 t)$. Распространяясь (без потери энергии) со скоростью v , это возбуждение дойдет до области пространства с координатой x за время $t_1 = \frac{x}{v}$. Тогда колебание частиц среды в этой точке будет описываться уравнением:

$$\xi(x, t) = A \cos[\omega_0(t - t_1)] = A \cos\left[\omega_0\left(t - \frac{x}{v}\right)\right], \quad (3.10)$$

которое можно записать в таком виде:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega_0 t - kx), \quad (3.10a)$$

где k – волновое число ($k=2\pi/\lambda$).

Для волны, распространяющейся во встречном направлении, волновое уравнение можно представить как:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega_0 t + kx) . \quad (3.10б)$$

Зафиксируем совокупность геометрических мест колебаний частиц среды с одинаковой фазой (они называются волновыми поверхностями) посредством соотношения $(\omega_0 t - kx) = \text{const}$. Дифференцирование по времени приводит к уравнению

$$(\omega_0 - k \, dx/dt) = 0, \quad (3.11)$$

из которого следует, что

$$dx/dt = \frac{2\pi/T}{2\pi/\lambda} = v. \quad (3.12)$$

Таким образом, v – это скорость перемещения волновых поверхностей (фазы) и поэтому называется фазовой скоростью.

На рисунках 3.7а и 3.7б изображены продольные плоская и сферическая волны.

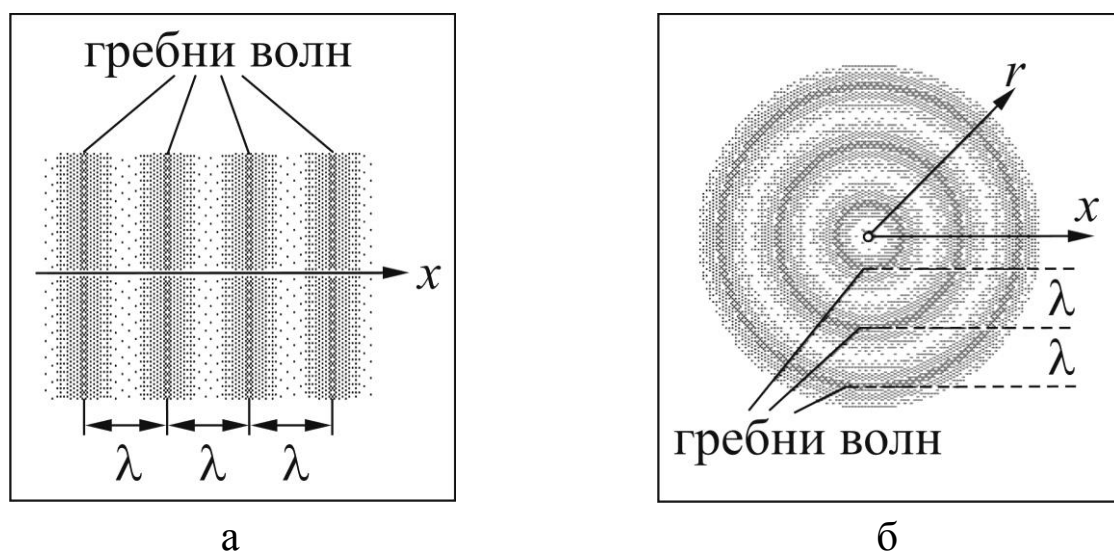


Рис.3.7. а) – Плоская продольная волна, б) – сферическая продольная волна; x, r – направления распространения волн

3.2.2. Физические параметры звука

Скорость звука – это скорость распространения звуковых волн в среде. Как правило, в газах скорость звука меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях скорость звука меньше, чем в твёрдых телах, что связано, в основном, с уменьшением сжимаемости веществ в этих фазовых состояниях. В среднем скорость звука в воздухе составляет $340 \div 344$ м/с. Скорость звука продольных волн в упругой среде вычисляется по формуле

$$v = \sqrt{E/\rho}. \quad (3.13)$$

Здесь E – модуль Юнга объемного сжатия (объемный модуль упругости); ρ – плотность среды (жидкости или газа). Эта формула применима и к распространению продольных волн в тонком металлическом стержне. Скорость распространения поперечной волны в твердом теле определяется той же формулой, но вместо модуля Юнга (объемного сжатия) E необходимо подставить модуль сдвига G .

В модели идеального газа $E = \gamma p$, где γ – показатель адиабаты ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – отношение удельных теплоемкостей газа при постоянных значениях давления и объема). Тогда для скорости распространения волны получим выражение:

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho}. \quad (3.14)$$

Колебательная (акустическая) скорость v_k – скорость, с которой движутся по отношению к среде в целом частицы (бесконечно малые части среды), колеблющиеся около положения равновесия при прохождении звуковой волны. Она определяется соотношением $v_k = A\omega$, где A – амплитуда колебаний частиц среды (амплитуда колебательной скорости), через которую проходит гармоническая звуковая волна, ω – циклическая частота. Для синусоидальной волны колебательная скорость равна модулю скорости колеблющихся частиц среды в момент прохождения положения равновесия – пересечения оси x (скорость определяется как первая производная гармонической функции 3.2 или 3.2а). Колебательную скорость следует отличать как от скорости движения самой среды, так и от скорости распространения звуковой волны или скорости звука v . При этом $v_k < v$ в любых средах (газах, жидкостях, твёрдых телах) и при любых достижимых в настоящее время интенсивностях звука.

Акустическое сопротивление (акустический импеданс) – именно эта величина характеризует упругие свойства среды, определяется отношением амплитуды звукового давления в среде к амплитуде колебательной скорости её частиц. Чем больше акустическое сопротивление, тем выше степень сжатия и разрежения среды при данной амплитуде колебания частиц среды. Численно удельное акустическое сопротивление среды Z равно

$$Z = \rho v. \quad (3.15)$$

Единицы измерения удельного акустического сопротивления: в системе СИ – Па·с/м, а в системе СГС – дин·с/см³ (1 Па·с/м = 10⁻¹ дин·с/см³).

Удельное акустическое сопротивление среды часто выражается в г/с·см², причём 1 г/с·см² = 1 дин с/см³.

Звуковое или акустическое давление – разность между мгновенным значением давления в данной точке среды при наличии звуковых колебаний и статического давления в той же точке при их отсутствии. Иными словами, звуковое давление есть переменное давление в среде, обусловленное акустическими колебаниями. Максимальное значение переменного акустического давления (амплитуда давления) p может быть рассчитано через амплитуду A колебания частиц (амплитуду колебательной скорости):

$$p = p_0 = 2\pi\nu\rho v A, \quad (3.16)$$

где ν – частота колебаний. На расстоянии в половину длины волны ($\lambda/2$) значение звукового давления меняет знак: положительное становится отрицательным. Разница давлений в двух точках с максимальным и минимальным его значениями (т.е. отстоящих друг от друга на $\lambda/2$ вдоль направления распространения волны) равна $2p$. Единицы измерения давления приведены в Разделе 2.1.

Интенсивность звука – это средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени. Определяется соотношением

$$I = \frac{pA}{Z} = \frac{p^2}{2\rho v} = A^2\rho v(2\pi\nu)^2. \quad (3.16a)$$

Измеряется в системе СИ в единицах Вт/м², в системе СГС в эрг/с либо оценивается в шкале децибел (см. ниже).

Если бегущие звуковые волны наталкиваются на препятствие, оно испытывает не только переменное давление, но и постоянное. Возни-

кающие при прохождении звуковых волн участки уплотнения и разрежения среды создают добавочные изменения давления в среде по отношению к окружающему её внешнему давлению. Такое добавочное внешнее давление носит название давления излучения (радиационное давление). Оно служит причиной того, что при переходе звуковых волн через границу жидкости с воздухом образуются фонтанчики жидкости и происходит отрыв отдельных капелек от поверхности. Этот механизм нашёл применение в приготовлении лекарственных веществ в виде аэрозолей. Радиационное давление часто используется при измерении мощности ультразвуковых колебаний в специальных измерителях – ультразвуковых весах.

Громкость звука – это физиологическая характеристика – субъективное восприятие силы звука (абсолютная величина слухового ощущения). Громкость, главным образом, зависит от звукового давления (3.16) или интенсивности звука (3.16а). Также на громкость звука влияют его спектральный состав (тембр), длительность воздействия звуковых колебаний, индивидуальная чувствительность слухового аппарата человека и другие факторы. Среди слышимых звуков следует особо выделить фонетические, речевые звуки и фонемы* (из которых состоит устная речь), и музыкальные звуки (из которых состоит музыка). Музыкальные звуки содержат не один, а несколько тонов, а иногда и шумовые компоненты в широком диапазоне частот. Восприятие звука естественным образом зависит от органа слуха человека, одного из пяти чувств человека – способности воспринимать звуки окружающего мира. Благодаря слуху человек различает звуки, распознает их характер, определяет местонахождение источника звука, овладевает речью.

Орган слуха состоит из наружного, среднего и внутреннего уха (рис. 3.8).

* Фонемы (др.-греч. φώνημα «звук») – минимальные различимые по смыслу единицы языка: при их замене (дом – том), перестановке (нос – сон), удалении (трон – тон), меняется смысл слова.



Рис. 3.8. Схематическое изображение органа слуха** [7a]

Как работает здоровое ухо:

- звуковые сигналы поступают в слуховой проход и вызывают колебания барабанной перепонки,
- колебания барабанной перепонки приводят в движение три слуховые косточки (остальные элементы опущены),
- посредством слуховых косточек колебания передаются в жидкость внутреннего уха (улитки),
- движение жидкости в улитке стимулирует крошечные волосковые сенсорные клетки,
- волосковые клетки преобразуют механические колебания в электрические сигналы,
- электрические сигналы посредством клеток спирального ганглия и слухового нерва передаются в кору головного мозга.

Мозг воспринимает и анализирует полученные сигналы как звук. Восприятие звука человеком измеряется в децибелах.

** Большой набор изображений органов слуха можно найти в известных поисковых системах по ключевой фразе «предел растяжимости барабанной перепонки».

Децибел – безразмерная единица, применяемая для измерения отношения физических величин: «энергетических» (интенсивности звука, мощности, энергии, плотности потока мощности и т.п.) или «силовых» (звуковое давление, силы тока, напряжения и т.п.). При этом используется логарифмическая шкала уровней затуханий и усиления. Величина, выраженная в децибелах, численно равна десятичному логарифму безразмерного отношения физической величины к одноимённой физической величине, принимаемой за исходную величину, умноженному на десять. Если используют отношение «энергетических» величин, в данном случае уровней интенсивности звука (уровней мощности звука) I , то:

$$L_{dB} = 10 \lg (I/I_0), \quad (3.17)$$

где I_0 величина, соответствующая нулевому уровню интенсивности ($I_0 = 1 \text{ пВт/м}^2$).

Если применяются «силовые» величины, в данном случае величина звукового давления p , используют соотношение:

$$A_{dB} = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (3.17a)$$

поскольку $I \sim p^2$. Здесь p – измеренная величина звукового давления, p_0 – величина звукового давления (за базис принята величина $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ на частоте 1 кГц.).

Иными словами, децибел L_{dB} , A_{dB} – это не абсолютная величина, как, например, ватт или вольт, а такая же относительная, как кратность или проценты, предназначенная для измерения отношения двух других величин. При этом к полученному отношению применяется логарифм.

рифмический масштаб. Русское обозначение единицы «децибел» – «дБ», международное – «dB». Децибел не является официальной единицей в системе единиц СИ, хотя по решению Генеральной конференции по мерам и весам допускается его применение без ограничений совместно с единицами СИ, а Международное бюро мер и весов рекомендовало включить его в эту систему.

Порог слышимости – минимальное звуковое давление, при котором звук данной частоты воспринимается ухом человека. Величину порога слышимости выражают в децибелах. Порог слышимости у конкретного человека зависит от индивидуальных свойств, возраста, физиологического состояния.

Порог болевого ощущения – величина звукового давления, при котором в слуховом органе возникают боли (что связано, в частности, с достижением предела растяжимости барабанной перепонки). Болевое ощущение определяет границу динамического диапазона слышимости человека, который в среднем составляет 140 дБ для тонального сигнала и 120 дБ для шумов со сплошным спектром. Превышение данного порога приводит к акустической травме.

Объективной характеристикой органов слуха является *аудиограмма* – зависимость восприятия звука от частоты или уровня громкости (звукового давления). Множество аудиограмм представлено в интернете (например, в поисковой системе Яндекс можно найти по ключевой фразе «Аудиограмма слуха – что такое»). На рис. 3.9 в качестве примера приведена одна из таких аудиограмм*.

*Аудиограмма – что это такое? https://aurora.ua/ru/sluch/diagnostika-slucha_sluch/audiogramma---chto-eto-takoe_.htm.

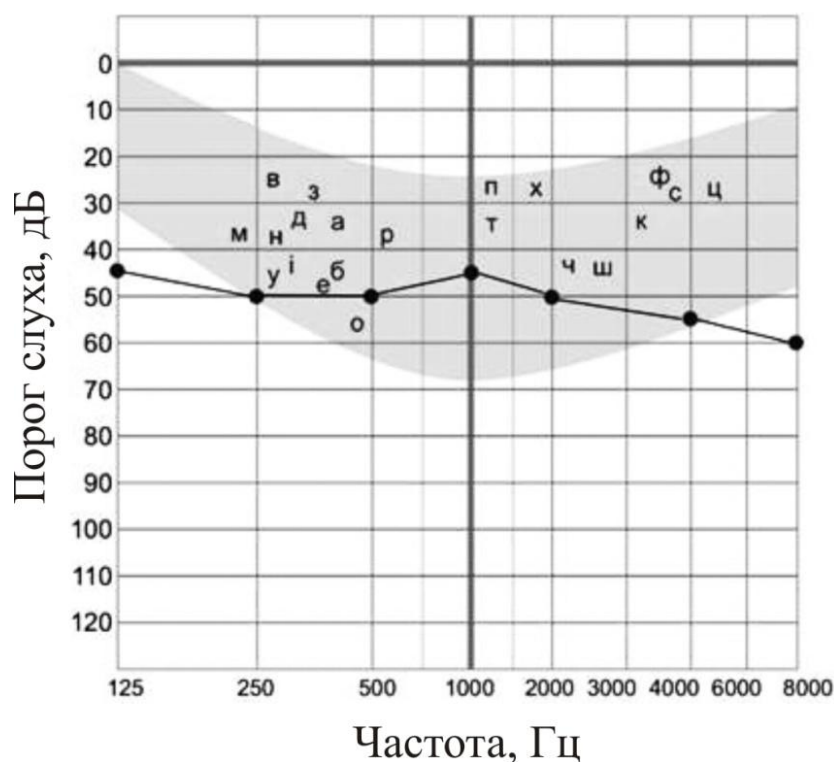


Рис. 3.9. Пример тональной аудиограммы органа слуха человека. Приведена зависимость восприятия звука (порог слышимости с учетом звучания букв от частоты на уровне шумов, выделено серым фоном). Т.е. восприятия тонального шума (tonal sound), характеризуемого единственной частотой или узкополосными различимыми на слух на фоне общего шума компонентами. Сплошная линия – восприятие звука фиксированной частоты

3.2.3. Распространение звука

Дифракция (огибание волнами препятствий) имеет место тогда, когда длина звуковой волны сравнима (или больше) с размерами находящегося на пути препятствия. Если препятствие по сравнению с длиной акустической волны велико, то дифракция не наблюдается.

Интерференция наблюдается при суперпозиции (наложении) т.н. когерентных волн (одинаковой частоты и постоянной разности фаз) при условии, что частицы среды колеблются вдоль одного направления. Проявляется это в том, что в определённых точках среды

наблюдается усиление или ослабление колебаний, т.е. происходит перераспределение энергии результирующих колебаний частиц среды. (Если частоты не совпадают, то имеет место равномерное распределение плотности энергии колебаний). При этом колебание точек среды зависит от соотношения фаз колебаний этих волн в данной точке. Если звуковые волны достигают определённого участка среды в одинаковых фазах (синфазно), то смещения частиц имеют одинаковые знаки и интерференция в таких условиях приводит к увеличению амплитуды колебаний. Если же волны приходят к точке среды в противофазе, то смещение частиц будет разнонаправленным, что приводит к уменьшению амплитуды колебаний. Эти вопросы подробно изложены в различных разделах курса общей физики.

При прохождении ультразвука через границу двух сред в общем случае происходит отражение, преломление и трансформация волны (продольная волна трансформируется в поперечную волну). *Трансформация волны происходит только в тех случаях, когда в этих средах могут распространяться поперечные волны (например, в металлах). Но при нормальном падении к границе этого не происходит. Естественно, трансформация волны не происходит при отражении на границе двух сред, в которых поперечные волны не распространяются (газ, жидкость, ткани).*

Отражение звука (применительно к медицине). На явлении отражения основана ультразвуковая диагностика и таких методов акустической диагностики, как аускультация и перкуссия. Отражение происходит в приграничных областях кожи и жира, жира и мышц, мышц и костей. Если ультразвук на своём пути наталкивается на органы, размеры которых больше длины волны, то происходит преломление и отражение ультразвука. Неоднородности в тканях организма не вызывают значительных отклонений: по сравнению с длиной ультразвуковой волны (порядка 2 мм) вероятные неоднородности – порядка 0,2 мм (по любому из линейных размеров) слишком малы, чтобы изменить направление фронта волны (волны их огибают, дифрагируют). Тем более, они пренебрежимо малы при более длинных волнах в зву-

ковом диапазоне^{*}. Степень отражения, или коэффициент отражения R

$$R = \frac{I_{\text{отраж.}}}{I_{\text{падающ.}}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \quad (3.176)$$

определяется различиями в величинах акустического сопротивления соприкасающихся тканей Z_1 и Z_2 . Очевидно, R меняется от 1 до 0 (эта формула справедлива при нормальном падении звуковой волны на границу раздела сред). Таким образом, чем больше разница в величинах акустического сопротивления сред, тем меньше энергии проходит через границу, разделяющую эти среды. У воздуха малая плотность (следовательно, и акустическое сопротивление). Поэтому на границе сред материал – воздух наблюдается практически полное отражение ультразвука. (Например, на границе сталь – воздух коэффициент отражения равен 1, (100%), ультразвук отражается от воздушной прослойки, Z_2). *Формально, если в формуле 3.176 поменять местами Z_1 и Z_2 , то получится одно и то же значение R . Однако такой подход не корректен, поскольку отражение от менее плотной среды и отражение от более плотной среды происходит с разными изменениями фазы колебаний, что и учтено при выводе формулы 3.176).* Эта особенность отражения ультразвука от сред с малой плотностью лежит в основе метода дефектоскопии материалов. Отметим, что по порядку величины акустические сопротивления сред соотносятся как 1 (газы): 10^3 (жидкости, биоткани): 10^6 (металлы). Значения акустического сопротивления биотканей близки (различаются лишь на 10–20 %). Однако этого различия вполне достаточно для регистрации отраженных УЗ волн. Это обстоятельство и лежит в основе УЗИ (ультразвукового

^{*} Интервал длин звуковых волн: в воздухе – от 1,7 м до 0,017 см, в воде – от 7,25 м до 0,073 см. При взаимодействии звуковой волны с неоднородностями любых размеров, в том числе биологическими тканями, происходит и рассеяние звука. Но в большей степени оно наблюдается, когда размеры неоднородности малы по сравнению с длиной волны. Например, рассеяние на красных кровяных тельцах (~ 7 мкм). Следует отметить, что рассеяние волн на неоднородностях – явление общее, характерное для волн любой природы (“diffuse – reflector” англ.).

исследования в медицине). Отметим, что при проведении УЗИ тканей используют специальные гели на водной основе, акустическое сопротивление которых мало отличается от акустического сопротивления тканей, чтобы удалить воздух из промежутка между корпусом излучателя и тканью. На отражении УЗ от более плотных сред основаны УЗ-методики определения местоположения и размеров камней в тканях и органах человека.

Преломление ультразвука. Акустическое сопротивление мягких тканей человека мало отличается от акустического сопротивления воды, в них содержащихся. Поэтому коэффициент отражения ультразвука невелик и во вторую среду переходит его большая часть (преломляется, если угол падения отклоняется от нормали). Это обстоятельство принимается во внимание при разработках различных методик УЗИ. Рассмотрение этих вопросов выходит за рамки данного пособия.

Стоячие звуковые волны. Если на пути распространения, например, ультразвуковых волн, имеются ткани с разными удельными акустическими сопротивлениями, то в той или иной степени происходит отражение от пограничного раздела. Наложение падающих и отражающихся волн может приводить к возникновению стоячих волн, если при этом не происходит изменения частоты отраженной волны и расстояние от поверхности излучателя до отражающей поверхностиратно половине длины волны. Уравнение стоячей волны (его просто получить путем сложения гармонических функций (3.10) и (3.10а)) записывается в виде:

$$\xi(x, t) = 2A \cos kx \cdot \cos \omega t. \quad (3.18)$$

Т.е. в результирующей волне частицы колеблются относительно положения равновесия с амплитудой, величина которой зависит от координаты x ($2A \cos kx$). Образуются пучности – области среды с наибольшим отклонением ее частиц от положения равновесия, и узлы (колебания частиц отсутствуют): волна локализуется в области пространства от излучателя до отражателя излучения. Отсюда название

«стоячая волна» – возбуждение не перемещается за пределы области между излучателем и отражателем волн. Расстояние между пучностями (длина стоячей волны) равно половине длины бегущей волны. Положения колеблющихся точек в разные моменты времени, разделённых полупериодом $T/2$, представлены на рис. 3.10. На рис. 3.11 показано направление колебаний частиц стоячей волны.

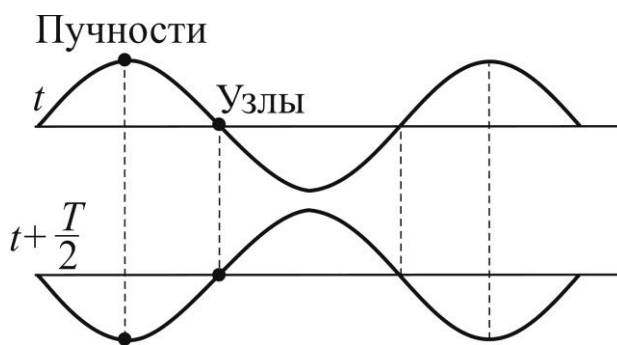


Рис. 3.10. Положения колеблющихся точек стоячей волны: вверху – когда отклонения достигают максимального абсолютного значения, внизу – спустя время $T/2$

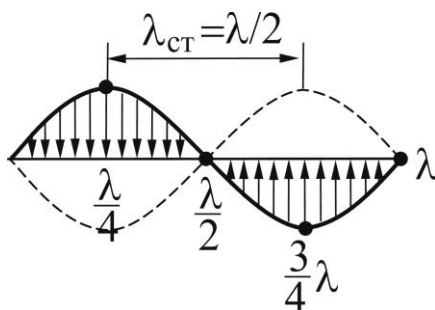


Рис. 3.11. Направление колебаний частиц стоячей волны

Биения. Колебания частиц среды в некоторой области при наложении, например, бегущей и отраженной волн, с незначительно различающимися частотами ($\Delta\omega \ll \omega$) можно рассматривать как сложение колебаний с близкими частотами и записать в следующем виде (для упрощения вычислений начальные фазы колебаний примем нулевыми):

$$x = A \cos(\omega t), \quad (3.18a)$$

$$x = A \cos\{(\omega + \Delta\omega)t\}, \quad (3.18б)$$

При их сложении наблюдаются так называемые биения колебаний. Уравнение результирующих колебаний записывается в виде:

$$x = 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos\left\{\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}\right)t\right\}, \quad (3.19)$$

или, поскольку частоты мало различаются:

$$x = \left\{2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)\right\} \cos(\omega t). \quad (3.20)$$

Таким образом, результирующее колебание является гармоническим колебанием на частоте ω , но с амплитудой (выделено фигурной скобкой), изменяющейся также по гармоническому закону с частотой $\frac{\Delta\omega}{2}$ (периодом $T^* = \frac{4\pi}{\Delta\omega}$), рис.3.12 верхний. Но амплитуда не может быть отрицательной, поэтому берется ее модуль $\left|2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)\right|$, рис. 3.12 нижний. Воспринимается оно как колебание с амплитудой, пульсирующей с частотой $\Delta\omega$ или с периодом биений $T_6 = \frac{2\pi}{\Delta\omega} = \frac{T^*}{2}$.

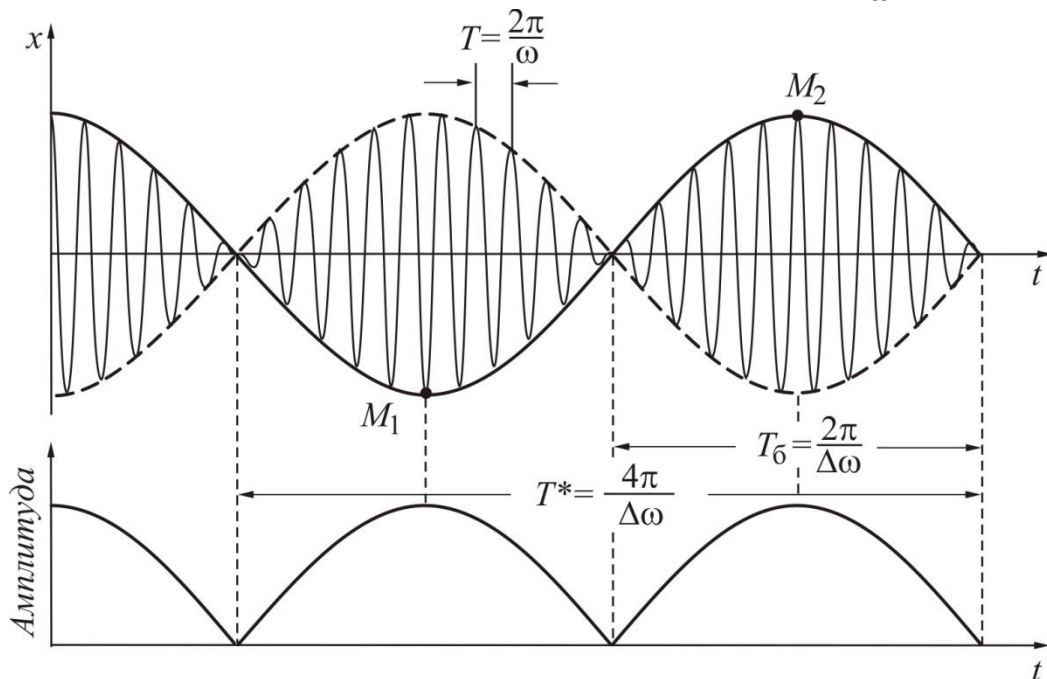


Рис. 3.12. Графическое представление биения колебаний

В контексте данного пособия это явление используется в медицинских приложениях (эффект Доплера, см. ниже).

В деталях связанные со сложением колебаний вопросы рассмотрены в курсе общей физики в разделе «Колебания и волны» (см. например, [1в]).

Далее рассмотрим вопросы, связанные с затуханием волнового процесса, которое происходит в реальной среде.

Затухание волн. Уменьшение интенсивности звуковой волны (для гармонической волны – уменьшение амплитуды) по мере её распространения обусловлено рядом причин. Основными из них являются: расхождение волны, рассеяние и поглощение звука. Затухание вследствие расхождения волны связано с тем, что на больших расстояниях r от источника поток излучаемой звуковой энергии по мере распространения распределяется на всё увеличивающуюся площадь волновой поверхности и, соответственно, уменьшается поток энергии, приходящийся на единицу поверхности. В сферической волне интенсивность I убывает с расстоянием пропорционально r^{-2} ($I = N/(4\pi r^2)$), где N – мощность излучения точечного источника (для цилиндрической – $\sim r^{-1}$, при распространении продольной гармонической плоской волны этим фактором можно пренебречь). Рассеяние звука на препятствиях в среде, на её неоднородностях, размеры которых малы или сравнимы с длиной волны, приводит к уменьшению потока энергии в первоначальном направлении распространения звука. Рассеяние в газах происходит на жидких каплях (туман) или частицах твёрдых веществ (аэрозоли), в жидкости – на пузырьках воздуха, в твёрдых телах – на различных инородных включениях или отдельных кристаллитах в поликристаллах. Рассеяние на неровностях и неоднородных областях границы среды приводит к уменьшению интенсивности при отражении звука и прохождении его через границу, т.е. приводит к изменению коэффициента отражения и прохождения волны. Поглощение звука – необратимый переход звуковой энергии в другие виды энергии (преимущественно в теплоту) обусловлено различными механизма-

ми. В тканях живых организмов основную роль играют вязкость и теплопроводность среды. Поглощение зависит также от частоты звуковых колебаний – пропорционально квадрату частоты. Детальное рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данного пособия.

Отметим только, что при затухании звука, обусловленном рассеянием и поглощением, амплитуда плоской гармонической волны убывает по закону e^{-dr} (r – направление распространения волны), а интенсивность звуковой волны (пропорциональна квадрату амплитуды) убывает с расстоянием по закону e^{-2dr} , где d – эффективный коэффициент затухания. Т.е. убывание интенсивности при расхождении волны происходит по степенному закону, как отмечалось в начале подраздела, а обусловленное рассеянием и поглощением – по экспоненциальному закону.

Коэффициент затухания выражается в единицах $\text{м}^{-1} (\text{см}^{-1})$ или в логарифмических единицах Нп/м, дБ/м. Нп – непер – также безразмерная логарифмическая единица измерения отношения двух величин. 1 Нп примерно равен 8,6 дБ, международное обозначение – Нр [7а, 7б].

Акустический эффект Доплера. Доплероскопия. Акустический эффект Доплера заключается в изменении частоты воспринимаемого звука (приемника) при движении источника звука и приемника друг относительно друга. С проявлением этого эффекта в повседневной жизни знаком, вероятно, любой человек: изменение звука сирены вначале приближающегося к наблюдателю, а затем удаляющегося от него объекта (звук сирены тепловоза, паровоза на переездах, пожарной машины, машины скорой помощи, полиции, да и просто звука двигателя быстро движущегося автомобиля). Эффект Доплера известен давно, физика явления и его приложений в деталях проработана в специальной литературе. Информация общего характера содержится в [7в]. В учебных целях можно порекомендовать проработку материала в [7г].

Всего имеется 4 варианта проявления эффекта Доплера:

1. Источник звука (источник) – генератор звуковых волн приближается к покоящемуся наблюдателю. Здесь и далее: ν – частота колебаний, ν – скорость распространения звука, ν' – воспринимаемая частота, $\nu_{ист.}$, $\nu_{пр.}$ – скорости движения источника и приемника колебаний, соответственно:

$$\nu' = \frac{1}{1 - \frac{\nu_{ист.}}{\nu}} \cdot \nu. \quad (3.21a)$$

2. Источник звука (источник) удаляется от покоящегося наблюдателя:

$$\nu' = \frac{1}{1 + \frac{\nu_{ист.}}{\nu}} \cdot \nu. \quad (3.21б)$$

3. Наблюдатель (приемник) приближается к покоящемуся источнику звука:

$$\nu' = \left(1 + \frac{\nu_{пр.}}{\nu}\right) \cdot \nu. \quad (3.21в)$$

4. Наблюдатель (приемник) удаляется от покоящегося источника звука:

$$\nu' = \left(1 - \frac{\nu_{пр.}}{\nu}\right) \cdot \nu. \quad (3.21г)$$

Представим себе кровеносный сосуд, на некотором участке которого необходимо определить скорость движения крови $\nu_{кр}$ (рис. 3.13).

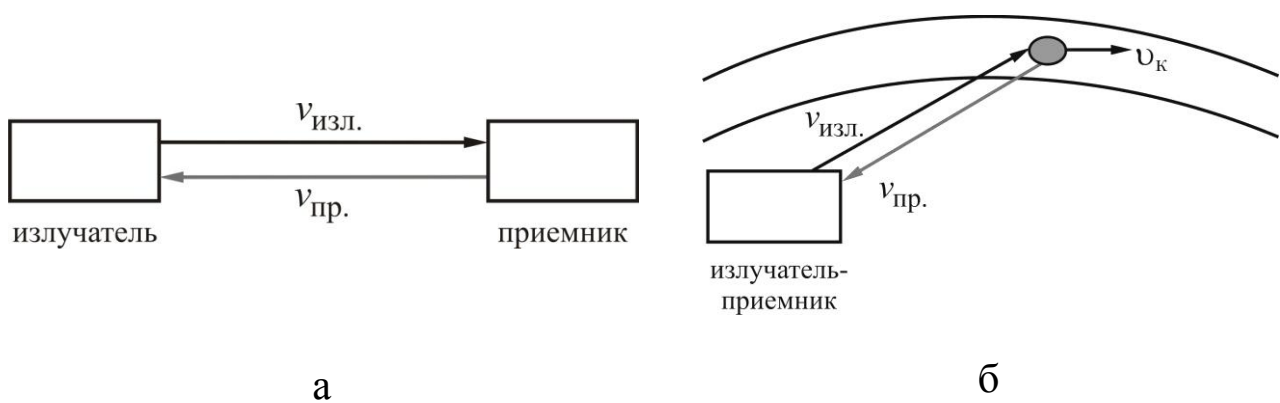


Рис. 3.13. Схематическое представление доплероскопии кровеносных сосудов: а) – общая схема, б) – в кровеносном сосуде

От источника ультразвука на сосуд направляется пучок ультразвуковых волн с частотой $\nu_{\text{изл.}}$. На некотором движущемся со скоростью $u_{\text{кр}}$ макроскопическом элементе крови, например, сгустке эритроцитов (пока это удаляющийся от источника «приемник»), ультразвук воспринимался бы на частоте, определяемой соотношением (3.21г) в виде:

$$\nu' = \left(1 - \frac{u_{\text{кр.}}}{u}\right) \cdot \nu_{\text{изл.}}, \quad (3.22)$$

где приводимая справа частота – это частота излучателя $\nu_{\text{изл.}}$. На этом элементе сгустка крови происходит отражение ультразвуковых волн в различных направлениях, в том числе и в направлении на приёмник. Таким образом, этот макроскопический элемент крови становится «источником» ультразвука (с частотой ν' , определяемой уравнением (3.22)), который удаляется от приемника с той же скоростью $u_{\text{кр.}}$. Теперь воспользуемся уравнением (3.21б) и получим выражение для частоты $\nu_{\text{пр.}}$ принимаемого звукового сигнала:

$$v_{\text{пр.}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_{\text{кр.}}}{v}\right)} \cdot v' = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_{\text{кр.}}}{v}\right)} \left(1 - \frac{v_{\text{кр.}}}{v}\right) \cdot v_{\text{изл.}}. \quad (3.23)$$

Здесь подставлена частота v' из уравнения (3.23). Уравнение (3.23) легко преобразуется в уравнение

$$v_{\text{пр.}} = \frac{v - v_{\text{кр.}}}{v + v_{\text{кр.}}} \cdot v_{\text{изл.}}, \quad (3.24a)$$

из которого следует, что $\Delta v = v_{\text{изл.}} - v_{\text{пр.}} = v_{\text{кр.}}(v_{\text{пр.}} + v_{\text{изл.}}) \cdot v^{-1}$. Но $\Delta v \ll v_{\text{изл.}}, v_{\text{пр.}}$. Примем, что $v_{\text{изл.}} \approx v_{\text{пр.}} = v$. Тогда:

$$\Delta v = v_{\text{изл.}} - v_{\text{пр.}} \approx v_{\text{кр.}} v / 2v. \quad (3.24b)$$

Таким образом, сложение этих ультразвуковых волн с близкими частотами приводит к результирующему колебанию на несущей частоте v , с амплитудой, изменяющейся также по гармоническому закону с частотой $2\Delta v$ (см. биения колебаний), детектируемой прибором. Т.е. величина Δv , называемая сдвигом частоты, пропорциональна скорости движения этого макроскопического элемента крови:

$$v_{\text{изл.}} - v_{\text{пр.}} = D v_{\text{кр.}}, \quad (3.25)$$

где D – нормировочный коэффициент.

3.2.4. Звуковые методы исследования. Аускультация и перкуссия

Аускультация (лат. *auscultatio*, выслушивание) – физический метод медицинской диагностики, заключающийся в выслушивании звуков, образующихся в процессе функционирования внутренних органов. Предложен Р. Лаэннеком в 1819 г.^{*} Аускультация бывает прямой – проводится путём прикладывания уха к прослушиваемому органу, и не прямой – с помощью *стетоскопа* или *фонендоскопа*^{**} (рис. 3.15) [8a].

* Рене Теофил Гиацинт Лаэннек (Laennek), 1781–1826, французский врач и анатом, основоположник клинико-анатомического метода диагностики, изобретатель стетоскопа.

** Стетоскоп (от др. греч. *στήθος*κόλιо, из *στήθος* «грудь» + *σκοπή* «осмотр») представляет собой удлинённую трубку в виде тонкого полого цилиндра, один конец которого шире другого и имеет вогнутую раковину для уха. Врач прикладывает ухо к широкому концу стетоскопа и прослушивает внутренние органы пациента (лёгкие, сердце, бронхи, кишечник и т.д.) на наличие посторонних шумов и гулов. Аналог стетоскопа, который был использован для аускультации сердца, представлял собой всего лишь свернутый лист бумаги.

Фонендоскоп (от греч. *Φωνή* – «звук», *ἔνδον* – «внутри» и *σκοπέω* – «наблюдаю») – является более современным стетоскопом. Его основное преимущество перед стетоскопом заключается в том, что можно выслушивать высокие звуки за счёт туго натянутой мембраны, которая чувствительна к вибрациям звука и усиливает их. Термин «фонендоскоп» был предложен Н.С. Коротковым. Стетофонендоскоп представляет собой совмещенную версию стетоскопа и фонендоскопа. Этот прибор позволяет выслушивать как низкие, так и высокие звуки. Именно им пользуются современные врачи. Он состоит из трех основных частей: звукоприёмного устройства – головка (капсула) с мембраной, – трубки, проводящей звук, – наконечников для ушей врача (оливы).

В обиходе стетофонендоскоп часто называют просто стетоскопом или фонендоскопом, при этом имея в виду именно этот современный модифицированный вариант.



а



б

Рис. 3.15. Стетоскопы раннего периода (а),
современный стетофонендоскоп (б) [8а]

*Перкуссия** (лат. *Percussio*) – удар, простукивание – один из основных объективных физических методов обследования больного, состоящий в выстукивании участков тела и определении по характеру возникающего при этом звука физических свойств расположенных под перкутируемым местом органов и тканей (главным образом, их плотности, «воздушности»** и эластичности. Метод изобрел в 1761 г. Ауэнбруггер (L. Auenbrugger). Физическое описание было дано чешским врачом Й. Шкодой в 1839 г.

Физические аспекты метода. При постукивании по участку тела возникают звуковые колебания подлежащих сред. В зависимости от частоты колебаний (она зависит и от силы удара) различают высокие и низкие перкуторные звуки. Высота звука прямо пропорциональна плотности подлежащих сред (при одинаковой силе удара). Так, при перкуссии грудной клетки над воздушной легочной тканью малой плотности образуются низкие звуки, а над плотной тканью сердца –

* Академик. Медицинская энциклопедия. Перкуссия. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_medicine/23135.

** Строгого физического определения нет. Надо понимать воздушность как меру содержания воздуха в тканях (мера ее неоднородности) и полостях органов.

высокие. Громкость звука пропорциональна амплитуде колебаний, которая тем выше, чем больше сила перкуторного удара, и обычно перкуторный звук тем громче и продолжительнее, чем меньше плотность перкутируемых тканей. К тканям или органам малой плотности относятся те, которые содержат большое количество воздуха. Перкуссия легких с нормальной «воздушностью» дает ясный, т.е. достаточно продолжительный и громкий перкуторный звук. При уменьшении «воздушности» легочной ткани (ателектаз), например при воспалительной инфильтрации, в результате которой в легких скапливается воспалительная жидкость, плотность ее повышается, и перкуторный звук становится тихим и коротким (тупым). Тупой перкуторный звук возникает, когда перкутируют имеющие большую плотность кости, мышцы, жидкости в полостях, такие органы, как печень, сердце, селезенка.

При перкуссии относительно крупных полостей, заполненных воздухом (желудок, или петля кишки, скопление воздуха в плевральной полости), возникает музыкальный звук, в котором доминирует основной тон. Этот звук похож на звук при ударе в барабан, поэтому его называют тимпанитом (*tympanon* – барабан) или тимпаническим перкуторным звуком. Характерное свойство тимпанического звука – способность менять высоту основного тона с изменением напряжения стенок полости (давления воздуха в ней). Так, например, с увеличением давления в плевральной полости при клапанном пневмотораксе тимпанит исчезает, и перкуторный звук принимает вначале тупотимпанический, а затем нетимпанический характер. Таким образом, при перкуссии разных участков тела здорового человека можно получить три основных варианта перкуторного звука: ясный, тупой и тимпанический. Ясный перкуторный звук возникает при перкуссии нормальной легочной ткани. Тупой или притупленный перкуторный звук наблюдается при перкуссии областей, под которыми находятся плотные среды, безвоздушные органы (сердце, печень, селезенка), массивные группы мышц (на бедре – «бедренная тупость»). Тимпанический звук возникает при перкуссии областей, к которым прилегают воздушные

полости; у здорового человека он выявляется над местом прилегания к грудной клетке желудка, наполненного воздухом (так называемое пространство Траубе).

Методы перкуссии. В зависимости от способа простукивания различают прямую (непосредственную) и опосредованную перкуссию. Непосредственная перкуссия производится ударами кончиков пальцев по поверхности исследуемого тела. При опосредованной перкуссии удары пальцем или молоточком наносятся по наложенному на тело другому пальцу или плессиметру – специальной пластинке из металла, дерева, пластмассы или кости (plēssō, греч. – ударять + metreō – мерить, измерять). (Плессиметр и молоточек появились в первой половине 19 века).

Среди методов непосредственной перкуссии известны способы Ауэнбруггера, Образцова, Яновского. Ауэнбруггер покрывал перкутируемое место рубашкой или надевал на руку перчатку и постукивал по грудной клетке кончиками вытянутых пальцев, нанося медленные не-сильные удары. Этот метод практически не применяется, поскольку не дает ясные и точные результаты. В.П. Образцов предложил более эффективный метод, используемый и в настоящее время довольно часто. Заключается он в следующем. «Предварительно указательный палец – молоточек плашмя кладут на тыльную поверхность среднего пальца, сильно прижимая его, затем палец – молоточек как бы соскальзывает со среднего пальца и мякотью ногтевой фаланги с силой ударяет по коже выстукиваемой области»*. Левой рукой при этом расправляют кожные складки перкутируемой области и ограничивают распространение звука. Ф.Г. Яновский применял однопальцевую перкуссию, при которой перкуSSIONные удары наносятся с минимальной силой мякотью двух (концевой и смежной с ней) фаланг среднего пальца правой руки. Непосредственная перкуссия используется для определения границ печени, селезенки, абсолютной «тупости сердца», особенно в детской практике и у истощенных больных.

* С.А. Гиляревский. Пропедевтика внутренних болезней. – М.: МедГиз, 1960. – 463 с.. стр.42; https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_medicine/23135

К методам опосредованной перкуссии относятся постукивание пальцем по плессиметру, молоточком по плессиметру и так называемая пальцевая бимануальная перкуссия. Приоритет введения пальцевой бимануальной перкуссии принадлежит Г.И. Сокольскому, который наносил удары кончиками двух-трех сложенных вместе пальцев правой руки по одному или двум пальцам левой руки. Герхардт (С. Gerhardt) предложил перкуссию пальцем по пальцу; она получила всеобщее признание. Преимуществом этого метода является то, что врач наряду со звуковым восприятием получает пальцем-плессиметром осязаемое ощущение силы сопротивления перкутируемых тканей. При перкуссии пальцем по пальцу средний палец левой руки (служит плессиметром) плашмя плотно прикладывают к исследуемому месту, остальные пальцы этой руки разведены и едва касаются или не касаются поверхности тела. Концевой фалангой среднего пальца правой руки, согнутого в первом суставе почти под прямым углом, ударяют (как молоточком) по средней фаланге пальца-плессиметра. Для получения четкого звука наносят равномерные, отрывистые, короткие удары, направленные вертикально к поверхности пальца-плессиметра. Во время перкуссии правая рука, согнутая в локтевом суставе под прямым углом, совершает лишь сгибание и разгибание в лучезапястном суставе для нанесения перкуторных ударов.

При исследовании областей тела, поверхность которых не позволяет плотно прижать к коже палец-плессиметр по его длине, перкуссию производят по способу Плеша: палец-плессиметр сгибают под прямым углом в первом межфаланговом суставе и прижимают к коже концом ногтевой фаланги, удары наносят пальцем-молоточком по основной фаланге.

В зависимости от силы наносимого удара различают сильную (громкую, глубокую), слабую (тихую, поверхностную) и среднюю перкуссии. Сильной перкуссией определяют глубоко расположенные органы и ткани (уплотнения или полость в легком на расстоянии 5–7 см

от грудной стенки). Среднюю перкуссию применяют при определении относительной «тупости» сердца и печени*.

Тихой перкуссией пользуются для нахождения границ абсолютной «тупости» сердца и печени, легкого и селезенки, небольших плевральных экссудатов и поверхностно расположенных уплотнений легких. Так называемую тишайшую (минимальную), ограничительную перкуссию производят столь слабыми ударами, что возникающий при этом звук находится в пороге восприятия ухом – пороговая перкуссия. Ее применяют для более точного определения абсолютной тупости сердца; при этом постукивание производят в направлении от сердца к легким.

Существует также метод аускультаторной перкуссии. Он заключается в выслушивании перкуторного звука стетоскопом, который устанавливают на противоположной перкутируемому органу стороне грудной клетки (при исследовании легких) или над перкутируемым органом (при исследовании печени, желудка, сердца) в месте его прилегания к брюшной или грудной стенке. Слабые перкуторные удары (или штриховые движения по коже подушечкой пальца) наносят по телу от места соприкосновения с ним стетоскопа в направлении к краю исследуемого органа. Пока перкуторные удары производят в пределах органа, перкуторный звук слышен ясно: как только перкуссия выходит

* Сердечная тупость (лат. *obtusio cardiaca*) – участок стенки грудной клетки, на котором при перкуссии по притуплению звука определяют область сердца. Обычно определяют границы сердечной тупости: правую, верхнюю и левую (нижнюю границу не определяют, поскольку снизу к сердцу не прилегают лёгкие). Кроме того, по характеру звука различают относительную и абсолютную сердечную тупость.

Абсолютная сердечная тупость (о. с. *absoluta*; синонимы: сердечная тупость малая, сердечная тупость поверхностная) – сердечная тупость, обнаруживаемая при тихой (тишайшей) перкуссии. Приблизленно соответствует проекции части сердца, не прикрытой легкими, на переднюю стенку грудной клетки.

Относительная сердечная тупость (о.с. *relativa*; синонимы: с.т. большая, с.т. глубокая) – сердечная тупость, обнаруживаемая при перкуссии, проводимой по межреберным промежуткам с применением резких перкуторных ударов строго в сагиттальном направлении. Это примерно соответствует проекции всего сердца, включая часть, прикрытую легким, на переднюю стенку грудной клетки [86].

за пределы обследуемого органа, звук резко заглушается или исчезает полностью. Детальное описание перечисленных методов и рассмотрение вопросов их клинического применения выходят за пределы данного пособия*.

3.3. Ультразвук и животный мир

Летучие мыши, использующие при ночном ориентировании эхолокацию (эхолокация – способ, при помощи которого положение объекта определяется по времени задержки возвращения отражённой волны), испускают сигналы чрезвычайно высокой интенсивности либо ртом (семейство «кожановые» – *Vespertilionidae*), либо имеющим форму параболического зеркала носовым отверстием (подковоносые – *Rhinolophidae*). На расстоянии 1 – 5 см от головы животного давление ультразвука достигает 60 мбар, то есть соответствует в слышимой нами частотной области давлению звука, создаваемого отбойным молотком. Эхо своих сигналов летучие мыши способны воспринимать при давлении всего 0,001 мбар, то есть в 10000 раз меньшем, чем давление, создаваемое испускаемыми сигналами. При этом летучие мыши могут обходить при полете препятствия даже в том случае, когда на эхолокационные сигналы накладываются ультразвуковые помехи с давлением 20 мбар. Механизм этой высокой помехоустойчивости неизвестен. При локализации летучими мышами предметов, например, вертикально натянутых нитей диаметром всего 0,005 – 0,008 мм на расстоянии 20 см (половина размаха крыльев), решающую роль играют сдвиг во времени и разница в интенсивности испускаемых и отраженных сигналов. Подковоносы могут ориентироваться и с помощью только одного уха (моноаурально) благодаря непрерывно движущимся ушным раковинам. Они способны компенсировать даже частотный

* «Анатомические звуки» — по таким ключевым словам в поисковых системах Интернета можно найти обширный материал по использованию звуков, исходящих от органов человека, в диагностических целях.

сдвиг между испускаемыми и отражёнными сигналами, обусловленный эффектом Доплера. Понижая во время полёта излучаемую (эхолокационную) частоту таким образом, чтобы частота отражённого ультразвука оставалась в области максимальной чувствительности их «слуховых» центров, они могут определять скорость собственного перемещения.

У ночных бабочек из семейства медведиц имеется генератор ультразвуковых помех, «сбивающий со следа» летучих мышей, преследующих этих насекомых.

Эхолокацию используют для навигации и птицы – жирные козодои, или гуахаро. Населяют они горные пещеры Латинской Америки – от Панамы на северо-западе до Перу на юге и Суринама на востоке. Живя в крошечной тьме, жирные козодои, тем не менее, приспособились виртуозно летать по пещерам. Они издают негромкие щёлкающие звуки, воспринимаемые и человеческим ухом (их частота примерно 7 кГц). Каждый щелчок длится одну-две миллисекунды. Звук щелчка отражается от стен подземелья, разных выступов и препятствий и воспринимается чутким слухом птицы. Ультразвуковой эхолокацией в воде пользуются китообразные.

3.4. Применение ультразвука в биологии, медицине и других областях. Краткий обзор

Диапазон используемых ультразвуковых частот довольно широк: от 0,5 до 15 МГц. Самые низкие частоты – до 1 МГц применяют при исследовании головы, 1,5÷3 МГц – в акушерстве и гинекологии и при обследовании внутренних органов брюшной полости, 2÷5 МГц – в кардиологии, самые высокие – от 5 до 15 МГц – в офтальмологии и при исследовании костно-суставного аппарата. Важно отметить, что *почти полное отражение ультразвуковых волн на границе между воздухом и мягкими тканями (99,95 %) препятствует введению ультразвука внутрь тела через воздух*. Чтобы устранить это препятствие, кожу

в месте ее соприкосновения с датчиком ультразвуковых волн смазывают специальным контактным гелем, а при его отсутствии – вазелиновым маслом или даже водой.

Ультразвуковое исследование. Благодаря хорошему распространению ультразвука в мягких тканях человека, относительной безвредности в сравнении с рентгеновскими лучами и простоте использования ультразвуковые методы широко применяются для визуализации внутренних органов человека. Ультразвук используется для исследования многих внутренних органов, однако только ультразвуковое исследование мозга и сердца выделены в отдельные дисциплины: эхоэнцефалографию и эхокардиографию. Причем исследований по эхокардиографии на порядок больше, чем по эхоэнцефалографии. Вероятно, это связано с тем, что сердце находится в постоянном движении, и подавляющее большинство эхокардиографических приемов и признаков связаны с анализом движения его различных структур – клапанов, стенок полостей сердца и стенок крупных сосудов. Поэтому получаемая информация здесь гораздо богаче, чем при исследовании неподвижных органов. Вопросы доплероскопии были рассмотрены выше.

УЗ – терапия. Помимо широкого использования в диагностических целях, ультразвук применяется в медицине (в том числе регенеративной) в качестве метода лечения. Обусловлено это следующими факторами:

- противовоспалительным, рассасывающим действием;
- анальгезирующим, спазмолитическим действием;
- кавитационным усилением проницаемости кожи.

Фонофорез – комбинированный метод лечения, при котором на ткани вместо обычного геля для ультразвуковой эмиссии (применяемого, например, при УЗИ) наносится лечебное вещество (как медикаменты, так и вещества природного происхождения). Известно, что ультразвук способствует более глубокому проникновению лекарственного вещества в ткани. При этом, чем меньше частота УЗ, тем больше глубина проникновения, поскольку коэффициент затухания волны прямо

пропорционален частоте. Для лечебных целей применяется ультразвук с частотой от 0,8 до 3 МГц. В организме человека ультразвук частотой $0,8 \div 1$ МГц распространяется на глубину $8 \div 10$ см, а при частоте $2,5 \div 3,0$ МГц на $1,0 \div 3,0$ см. Ультразвук поглощается тканями неравномерно: чем выше акустическая плотность, тем меньше поглощение.

При проведении ультразвуковой терапии на организм человека действуют три фактора:

- механический (вибрационный микромассаж клеток и тканей);
- тепловой (повышение температуры тканей и проницаемости клеточных оболочек);
- физико-химический (стимуляция тканевого обмена и процессов регенерации).

Биологическое действие ультразвука зависит от его дозы (интенсивности), которая может быть для тканей стимулирующей, угнетающей или даже разрушающей. Наиболее адекватными для лечебно-профилактических воздействий являются небольшие дозировки ультразвука (до $1,2 \text{ Вт/см}^2$), особенно в импульсном режиме. Ультразвук оказывает болеутоляющее, антисептическое (противомикробное), сосудорасширяющее, рассасывающее, противовоспалительное, десенсибилизирующее (противоаллергическое) воздействие.

Ультразвуковая терапия не применяется на область мозга, шейных позвонков, костные выступы, области растущих костей, ткани с выраженным нарушением кровообращения, на живот при беременности, мошонку. С осторожностью ультразвук применяют на область сердца, эндокринные органы.

УЗ в косметологии. Многофункциональные косметологические аппараты, генерирующие ультразвуковые колебания с частотой 1 МГц, применяются для регенерации клеток кожи и стимуляции в них метаболизма. С помощью ультразвука производится микромассаж клеток, активизирующий микроциркуляцию крови и лимфодренаж. В результате повышается тонус кожи, подкожных тканей и мышц. Ультразву-

ковой массаж способствует выделению биологических активных веществ, ликвидирует спазм в мышцах, в результате чего разглаживаются морщины, подтягиваются ткани лица и тела. С помощью ультразвука осуществляется не только более глубокое введение косметических средств и препаратов, но также выводятся токсины и очищаются клетки.

Ультразвук в биологии. Способность ультразвука разрывать оболочки клеток нашла применение в биологических исследованиях, например, при необходимости отделить клетку от ферментов. Ультразвук используется также для разрушения таких внутриклеточных структур, как митохондрии и хлоропласты с целью изучения взаимосвязи между их структурой и функциями. Другое применение ультразвука в биологии связано с его способностью вызывать мутации. Есть сообщения, что ультразвук даже малой интенсивности может повредить молекулу ДНК. Искусственное целенаправленное создание мутаций играет большую роль в селекции растений. Главное преимущество ультразвука перед другими мутагенами (рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи) заключается в том, что с ним чрезвычайно легко работать. Обсуждение этих специальных вопросов выходит за пределы данного пособия.

Ультразвуковая очистка. Применение ультразвука для механической очистки основано на возникновении под его воздействием в жидкости различных нелинейных эффектов. К ним относятся кавитация, акустические течения, звуковое давление. Основную роль играет кавитация. Её пузырьки, возникая и схлопываясь вблизи загрязнений, разрушают их. Этот эффект известен как *кавитационная эрозия*. Используемый для этих целей ультразвук имеет низкую частоту и повышенную мощность. В лабораторных и производственных условиях для мытья мелких деталей и посуды применяются ультразвуковые ванны, заполненные растворителем (вода, спирт и т.п.). Иногда с их помощью от частиц земли моют даже корнеплоды (картофель, морковь, свекла и др.) [8в].

3.5. Инфразвук

Инфразвук (от лат. *Infra* – ниже, под) – упругие волны, аналогичные звуковым, но имеющие частоту более низкую в сравнении с воспринимаемой человеческим ухом. За верхнюю границу частотного диапазона инфразвука обычно принимают $16 \div 25$ Гц. Нижняя же граница инфразвукового диапазона условно определена как 0,001 Гц. Практический интерес могут представлять колебания от десятых и даже сотых долей герц, то есть с периодами в десяток секунд.

Природа возникновения инфразвуковых колебаний и слышимого звука одинакова, поэтому инфразвук подчиняется тем же закономерностям. Для их описания используется такой же математический аппарат, как и для обычного слышимого звука (кроме понятий, связанных с уровнем звука). Инфразвук слабо поглощается средой, поэтому может распространяться на значительные расстояния от источника. Инфразвук обладает целым рядом особенностей, связанных с низкой частотой колебаний упругой среды:

- имеет большие амплитуды колебаний, по сравнению с акустическими волнами равной мощности;
- гораздо дальше распространяется в воздухе, поскольку его поглощение в атмосфере незначительно;
- из-за очень большой длины волны ярко выражена дифракция, вследствие чего он легко проникает в помещения и огибает преграды, задерживающие слышимые звуки;
- вызывает вибрацию крупных объектов, приводя при определенных условиях к их механическому резонансу.

Перечисленные особенности инфразвука затрудняют уменьшение отрицательных последствий его влияния, поскольку обычные способы устранения шума малоэффективны.

Источники инфразвука. Природные. Инфразвук возникает при землетрясениях, ударах молний, при сильном ветре (инфразвуковой аэродинамический шум) во время бурь и ураганов. При помощи инфразвука общаются между собой киты и слоны.

Техногенные. Техногенный инфразвук порождается колебаниями оборудования, имеющего поверхности больших размеров, мощными турбулентными потоками жидкостей и газов, при ударном возбуждении конструкций, вращательном и возвратно-поступательном движении массивных частей механизмов. Основными техногенными источниками инфразвука являются тяжёлые станки, ветряные электростанции, вентиляторы, электродуговые печи, поршневые компрессоры, турбины, виброплощадки, водосливные плотины, реактивные двигатели, судовые двигатели. Кроме того, инфразвук возникает при наземных, подводных и подземных взрывах.

Распространение инфразвука. Для инфразвука характерно малое поглощение в различных средах, вследствие чего инфразвуковые волны в воздухе, воде и в земной коре могут распространяться на очень большие расстояния, и он может служить предвестником бурь, ураганов, цунами. Это явление находит практическое применение при определении места сильных взрывов или положения стреляющего оружия. Звуки взрывов, содержащие большое количество инфразвуковых частот, применяются для исследования верхних слоёв атмосферы, свойств водной среды.

Физиологическое действие инфразвука. Физиологическое действие инфразвука на человека зависит только от его спектральных, временных характеристик, мощности и не зависит от того, на открытом пространстве или в закрытом помещении находится человек.

Патогенное действие инфразвука заключается в повреждении нервных образований головного мозга, органов эндокринной системы и внутренних органов вследствие развития тканевой гипоксии из-за ликворогемодинамических и микроциркуляторных нарушений. При 180÷190 дБ действие инфразвука приводит к разрыву легочных альвеол и, как правило, к летальному исходу. Другие зоны интенсивных кратковременных воздействий вызывают синдром резко выраженного инфразвукового дискомфорта, предел переносимости которого отме-

чается уже при 154 дБ. Исследования показали, что низкочастотные акустические колебания, в том числе и инфразвукового диапазона частот от 1 до 100 Гц, продолжительностью от 25 с до 2 мин с удельным звуковым давлением от 145 до 150 дБ вызывают у испытуемых ощущение вибрации грудной стенки. Отмечается сухость в полости рта, нарушение зрения, головная боль, головокружение, тошнота, кашель, удушье, беспокойство в области подрёбер, звон в ушах, модуляция звуков речи, боли при глотании. Наблюдаются и некоторые другие признаки нарушений в деятельности организма. Отмечено, что инфразвук негативно сказывается на зрении: ухудшаются зрительные функции, снижается острота зрения, сужается поле зрения, ослабляется аккомодационная способность, нарушается устойчивость фиксации глазом наблюдаемого объекта. Шум на частотах $2\div 15$ Гц при уровне интенсивности 100 дБ приводит к возрастанию ошибок слежения за стрелочными индикаторами. Проявляется судорожное подергивание глазного яблока, нарушение функции органов равновесия. Летчики и космонавты, подвергнутые на тренировках воздействию инфразвука, медленнее решали даже простые арифметические задачи. Существует предположение, что различные аномалии в состоянии людей при плохой погоде, объясняемые климатическими условиями, являются на самом деле следствием воздействия инфразвуковых волн. Полагают, что негативное влияние инфразвука связано с тем, что в инфразвуковой области лежат частоты собственных колебаний некоторых органов и частей тела человека. Это вызывает нежелательные резонансные явления. Укажем некоторые частоты собственных колебаний человека: для всего тела в положении лежа – $3\div 4$ Гц; грудной клетки – $5\div 8$ Гц; брюшной полости – $3\div 4$ Гц; глаз – $12\div 27$ Гц.

Особенно вредно воздействие инфразвука на сердце. При достаточной высокой мощности возникают вынужденные колебания сердечной мышцы. При резонансе (на частотах $6\div 7$ Гц) их амплитуда возрастает, что может вызвать кровоизлияние в сердечную мышцу.

В последние годы инфразвук стали шире применять в медицин-

ской практике. Так, в офтальмологии инфразвуковые волны с частотами до 12 Гц используются при лечении близорукости. При лечении заболеваний век используется инфразвук для фонофореза, а также для очищения раневых поверхностей, для улучшения гемодинамики и регенерации в веках, массажа и т.д. [см. также 8г].

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Жизнедеятельность человека в явной или скрытой форме связана с физическими явлениями и процессами, которые составляют основу молекулярной физики. Вопросы жизнедеятельности человека, безусловно, шире и сложнее вопросов типа: можно ли сварить яйцо, мясо и прочие продукты в горах, можно ли там приготовить чай и т.д. Ответ банальный – конечно можно. На высокогорье расположены селения, монастыри (например, тибетские), тренировочные базы разного назначения, метео – и геостанции, астрономические обсерватории и т.п. и даже крупные города*. Есть и другой аспект – жизнедеятельность живых организмов в условиях экстремально низких температур, в зонах вечной мерзлоты и снегов и т.д. Даже в этих условиях люди нормально работают и их обслуживают медицинский персонал разного уровня и службы организации питания. Организм человека, рожденного в этих условиях, генетически приспособлен к ним, и многовековой опыт выживания в непростых для обычного человека условиях передается из поколения в поколение. Сегодня путешествия доступны практически любой категории населения по достатку и возрасту, растет число любителей экстремального отдыха. Поэтому знания правил поведения в нестандартных условиях крайне важны. *То, что еще недавно было привилегией небольшой группы хорошо подготовленных спортсменов (дайвинг, альпинизм, скоростной спуск, слалом и т.д.), поставлено на поток бизнес-туризма.* Эти знания в определенной степени можно почерпнуть из Приложения 1. Весьма полезная информация о том, что надо знать человеку, когда в силу обстоятельств он оказывается в непривычных для себя условиях (работа и путешествия в горах, в подземелье, в странах с жарким климатом и т.п.), размещена на сайте [9б] в разделе «Особенности организации питания в разных видах туризма». Выдерж-

* Наиболее известный из них г. Мехико – 2240 м над уровнем моря. Самый высокогорный город в мире (шахтерский городок) находится в Перу, Ла-Ринконада (5099 м). Далее Немчи-Базар в Непале (4150) и Эль-Аито в Боливии (4150) [9а].

ки из этого обстоятельного пособия с поправками приведены в Приложении 1. Они касаются только деятельности в горных условиях, поскольку именно в этих условиях достаточно длительное время проходит отдых и работа большого количества людей.

Жизнь организмов определяется температурой в большей степени, чем каким-либо другим фактором внешней среды в связи с тем, что все организмы построены из химических компонентов и все процессы жизни происходят на основе химических реакций, подчиненных законам термодинамики. Температура определяет не только скорость химических реакций, но также является причиной структурной перестройки протеинов, фазовых превращений жиров, изменения структуры воды. Витальная температурная зона – интервал, в пределах которого осуществляется активная жизнедеятельность большинства микроорганизмов, укладывается, за некоторым исключением, в интервал от 0 °C до 50÷60 °C. Нижняя граница активной жизнедеятельности микроорганизмов лимитируется, прежде всего, уровнем капельно-жидкой воды, постоянным потоком которой в клетке поддерживаются трехмерная структура белковых молекул и других структурных носителей жизни и протекающие процессы. Поэтому кристаллизация воды в омывающих жидкостях и клетках служит критическим порогом их жизни. Однако если верхний порог витальной зоны, который определяется тепловой коагуляцией белков, довольно узок, то нижняя граница зоны жизнедеятельности более широка и «размыта», вследствие многих прямых и косвенных адаптаций к сохранению части воды в жидком состоянии, выработавшихся у организмов в процессе эволюции. Выживание микроорганизмов после глубокого охлаждения – общеизвестный факт. (*Любителям зимней ловли рыбы это хорошо известно – замерзшие на морозе рыбешки в теплой воде оживают*). Хранение в лабораториях биоматериалов при глубоких низких температурах порядка – 50÷ – 60 °C и ниже общеизвестно. Наиболее яркий пример – хранение и транспортировка спермы в сосудах Дьюара при температуре жидкого азота (– 195,7 °C) в широко применяемых в животноводстве техно-

логиях искусственного осеменения. Эти и родственные вопросы составляют широкую область исследований и практических приложений *криобиологии**.

Более подробно вопросы, связанные с жизнью микроорганизмов, освещены в специальной литературе [11, 12]. Некоторые из них вкратце представлены в Приложении 2.

В Разделах 4–6 в данной части курса рассмотрены ряд вопросов, составляющих предметную область молекулярной физики и её место в понимании вопросов жизнедеятельности человека. Молекулярная физика – это раздел физики, изучающий молекулярную форму движения материи, движение большой совокупности молекул. Более строгое определение: молекулярная физика – это раздел физики, изучающий физические свойства тел в зависимости от их строения, сил взаимодействия между образующими тело молекулами, атомами, ионами и от характера теплового движения.

* Криобиология (от греч. *крѳос* – холод, *bіos* – жизнь и *logos* – наука) – раздел биологии, в котором изучаются эффекты воздействия низких температур на живые организмы. На практике, в рамках криобиологии занимаются исследованиями биологических объектов или систем при температурах ниже нормальных. В качестве объектов могут служить белки, клетки, ткани, органы, или целые организмы. Используются температуры в диапазоне от умеренно низких до криогенных (сверхнизких). Научные основы криобиологии были заложены в конце XIX века П.И. Бахметьевым – выдающимся русским учёным, изучавшим переохлаждение у насекомых и анабиоз у летучих мышей. Результаты криобиологических исследований находят своё применение в хранении растений, клеточных культур, эмбрионов для ЭКО, хранения икры редких рыб и т.д. Важнейшие направления исследований:

- исследование адаптаций к холоду микроорганизмов, растений и животных (спячка);
- криоконсервация клеток, тканей, гамет и эмбрионов животного и человеческого происхождения для длительного сохранения в медицинских целях, как правило, с использованием веществ, защищающих клетки во время замораживания и размораживания (криопротекторы);
- сохранение органов в гипотермических условиях для трансплантации;
- лиофилизация фармацевтических препаратов;
- криохирургия – хирургия с использованием криогенных газов/жидкостей для разрушения тканей [10].

Из этого определения следует, что динамический метод исследования, который используется при описании механических явлений, не применим в молекулярной физике, поскольку не представляется возможным выделить движение отдельно взятой молекулы из этого множества молекул (их порядка 10^{19} в одном кубическом см. газа). Поэтому для описания явлений молекулярной физики используют статистический либо термодинамический методы, собственно и разработанные для этих целей.

Статистический метод заключается в установлении закономерностей между статистическими величинами, характеризующими совокупность молекул, образующих систему. Метод лежит в основе Молекулярно-Кинетической Теории вещества (МКТ).

Термодинамический метод – это установление взаимосвязи между макроскопическими параметрами системы (термодинамика).

Это обстоятельство предопределило условное разделение данной части курса под названием «Молекулярная физика» на три раздела:

- молекулярно-кинетическую теорию вещества, в основе построения которой лежит статистический подход;
- термодинамику;
- описание свойств физических систем и протекающих в них процессов.

РАЗДЕЛ 4. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВЕЩЕСТВА И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

4.1. Определения. Введение в молекулярно-кинетической теории вещества

Системы, состояния, процессы

В известных пределах для характеристики вещества можно использовать понятие «агрегатное состояние»^{*}:

- твёрдое, вещество сохраняет свою форму;
- жидкое состояние, сохраняет объём, принимая форму сосуда;
- газообразное состояние, вещество не сохраняет ни форму, ни объём.

Однако, при определенных условиях одно и то же вещество может находиться в твёрдом, жидком и в газообразном (в виде пара) состояниях. Например, вода в виде льда, жидкости и пара.

Более строгое определение состояния вещества заключено в понятие «фаза».

Фаза – макроскопическая физически однородная часть вещества, отделенная от остальных частей системы (в механике это совокупности рассматриваемых тел) границами раздела так, что она может быть извлечена из системы механическим путем.

Система может содержать несколько твердых фаз, две жидкие, твердую и жидкую, но только одну газообразную фазу.

Простейшая система – газ характеризуется набором трех макроскопических параметров: давление p , объём V и температура T . Уравнение, устанавливающее между ними взаимосвязь, называется уравнением состояния:

$$f(p, V, T) = 0. \quad (4.1)$$

^{*} Aggregated – собранные вместе.

Равновесное состояние системы – это состояние, когда макроскопические параметры во всех частях системы одинаковы. Важный для последующего обсуждения вопросов термодинамики живых систем вид состояния системы – стационарное состояние, когда ее параметры не меняются со временем: $p, V, T \neq f(t)$.

Переход из начального состояния (1) в конечное состояние (2)

$$p_1, V_1, T_1 \rightarrow p_i, V_i, T_i \rightarrow p_2, V_2, T_2, \quad (4.2)$$

где любые промежуточные состояния характеризуются равновесными параметрами p_i, V_i, T_i , называется равновесным (или квазистатическим) процессом.

Если процесс может осуществляться в обратном направлении через те же промежуточные равновесные состояния, процесс называется обратимым. Схематически это представляется следующим образом:

$$p_1, V_1, T_1 \leftrightarrow p_i, V_i, T_i \leftrightarrow p_2, V_2, T_2. \quad (4.3)$$

Если система возвращается в первоначальное положение, процесс называется круговым (циклическим). Если при этом она проходит через те же равновесные промежуточные состояния, процесс называется обратимым круговым (циклическим). Графически обратимые процессы, как правило, изображаются непрерывными линиями, необратимые процессы – пунктирными.

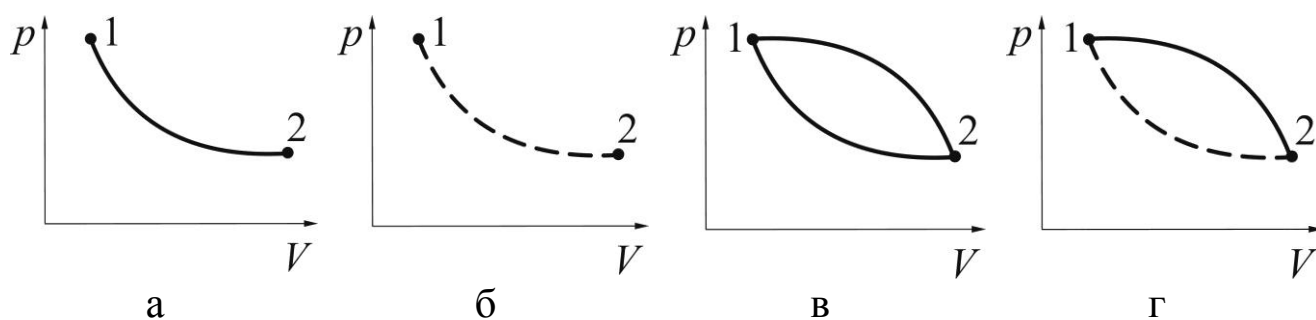


Рис. 4.1. Графическое изображение процессов: а) – обратимый процесс, б) – необратимый процесс, в) – круговой обратимый процесс, г) – круговой необратимый процесс

4.1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества

Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества (МКТ) формулируются следующим образом:

- все тела состоят из молекул,
- молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении,
- между молекулами имеется взаимодействие, которое в совокупности с тепловым движением определяет агрегатное состояние: газы, жидкости, твердые тела.

В качестве модели для построения МКТ используется идеальный газ – совокупность невзаимодействующих частиц точечной массы. Такой модели соответствует, например, атмосферный воздух при 0 °С и атмосферном давлении. Его характеристики следующие:

- число Лошмидта – $2,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – число молекул в 1 см^3 .
- число Авогадро – $6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ (число молекул в 1 моле вещества).
- d (диаметр молекулы) $\approx 1,5 \text{ \AA}$ и несколько больше (например, для паров воды $\text{H}_2\text{O} = 3 \text{ \AA}$) ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см} = 10^{-10} \text{ м} = 0,1 \text{ нм}$)
- v (интервал скоростей) $= 0 \div 10^5 \text{ м/с}$
- z (частота столкновений) $= 10^9 \div 10^{12} \text{ с}^{-1}$

Адекватность использования атмосферного воздуха в качестве

модели идеального газа следует из хорошо известных газовых законов.

4.1.2. Изопроцессы в идеальном газе

Для определения базовых характеристик системы в газовой фазе и установления основных закономерностей изменения ее состояния (газовые законы) принято рассматривать процессы, происходящие при одном фиксированном (постоянном) параметре.

Изотермический (Изо – T) процесс (рис. 4.2). Описывается уравнением Бойля–Мариотта (установлен Р. Бойлем в 1662 г. и независимо Э. Мариоттом* в 1676 г.):

$$\text{при} \quad T = \text{const.} \quad pV = \text{const.} \quad (4.4)$$

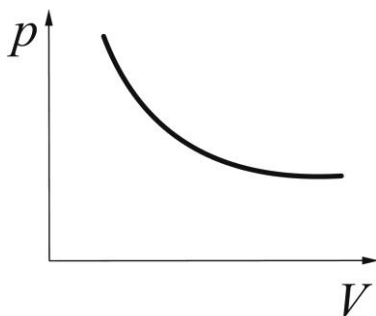


Рис. 4.2. Графическое представление изотермического процесса

Изобарный (изобарический, Изо – p) процесс подчиняется закону Гей – Люссака** (рис. 4.3):

$$\text{при} \quad p = \text{const} \quad V = V_0(1 + \alpha t) \quad (4.5)$$

$$\text{или} \quad V = V_0 \alpha T, \quad (4.5a)$$

* Эдм Мариотт (*Edme Mariotte*) – аббат, французский физик XVII века. Один из основателей (1666) и первых членов Академии наук, основанной в Париже.

** Жозеф Луи Гей-Люссак (*Joseph Louis Gay-Lussac*) – французский химик и физик, член Французской Академии наук (1806).

где $\alpha = 1/273,15 \text{ (}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)}$ – коэффициент теплового расширения газа, T – температура в шкале Кельвина, связанная с широко распространенной температурной шкалой Цельсия (t) соотношением^{*}:

$$T = t + 273,15. \quad (4.6)$$

Учитывая уравнение (4.5а), закон Гей-Люссака можно записать в виде:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.7)$$

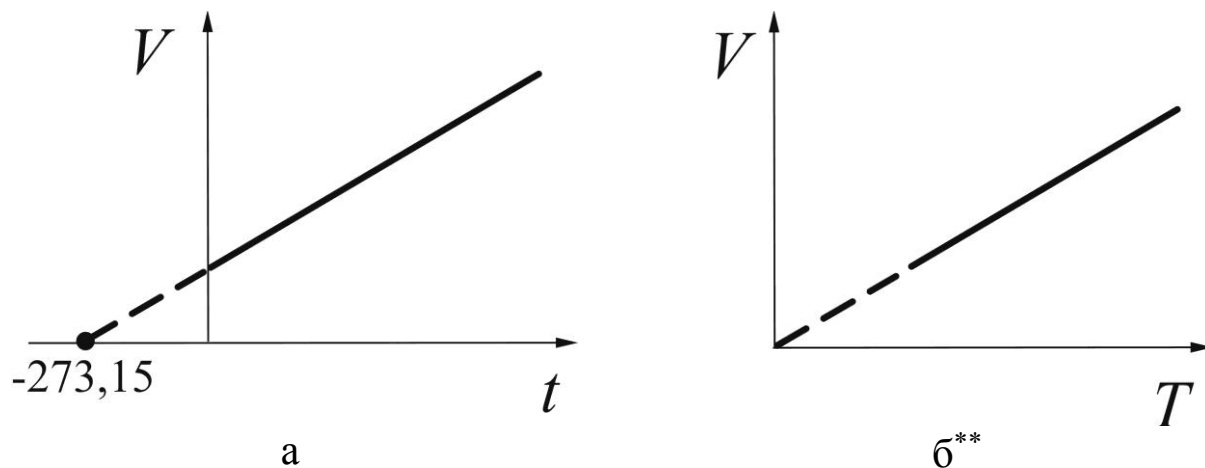


Рис 4.3. Графическое представление изобарного процесса в температурных шкалах: а) – Цельсия, б) – Кельвина

Изохорический (изохорный, Изо – V) процесс описывается законом Шарля^{*}, установленным в 1687 (уточнен Гей-Люссаком в 1802 г.) (рис. 4.4):

^{*} Как будет показано далее, шкала Кельвина принята в качестве абсолютной термодинамической шкалы температур, в которой единицей измерения абсолютной температуры является Кельвин (К). Международной практической температурной шкалой является шкала, ранее именовавшаяся шкалой Цельсия, в которой единицей измерения является градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Температура 0К называется абсолютным нулём ($-273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

^{**} При малых значениях V и T реальный газ не соответствует модели идеального газа (см. также комментарии в подразделе 5.3.3.).

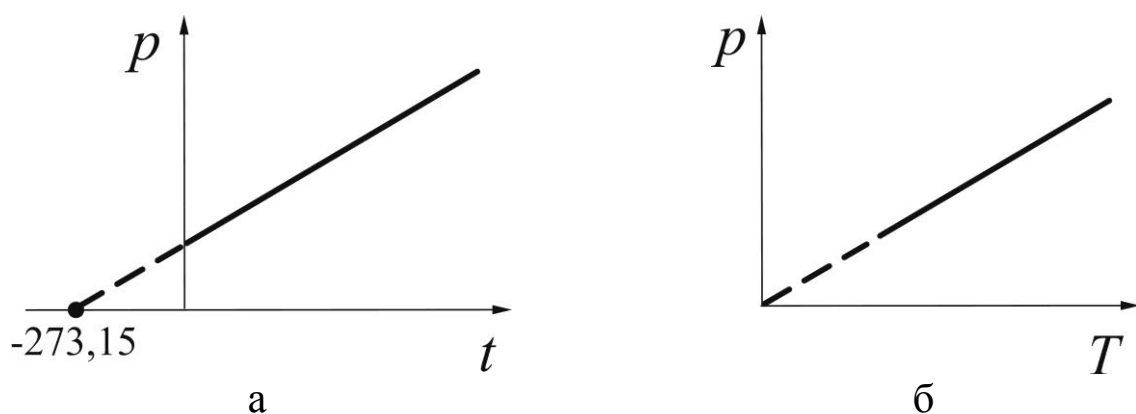


Рис. 4.4. Графическое представление изохорического (изохорного) процесса: а) – в шкале Цельсия, б) – в шкале Кельвина

$$\text{при } V = \text{const.} \quad p = p_0(1 + \alpha t), \quad (4.8)$$

$$p = p_0 \alpha T \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.8a)$$

При относительно небольших значениях плотности газа изменения его состояния с высокой точностью подчиняются так называемому уравнению состояния идеального газа

$$pV/T = \text{const.} \quad (4.9)$$

Согласно закону Авогадро один моль любого газа при нормальных условиях занимает один и тот же объем V_m и, естественно, величины константы в уравнении (4.9) будут одинаковы для всех газов. То-

* Жак Александр Сезар Шарль (*Jacques Alexandre César Charles*) – французский изобретатель и учёный. Известен как изобретатель наполняемого водородом (или другим газом легче воздуха) воздушного шара, получившего по имени изобретателя название «шарльер», в противоположность «монгольфьеру». Первый его воздушный шар поднялся в Париже с Марсова поля 27 августа 1783 года. В том же году 3 декабря он вместе с инженером, одним из изготовителей воздушного шара Николя Луи Робертом (*Nicolas-Louis Robert*), предпринял своё первое воздушное путешествие.

гда уравнение состояния идеальных газов для моля газа запишется в виде:

$$pV_m = RT \quad (4.9a)$$

или для произвольной массы m газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (4.9б)$$

Уравнение (4.9a) называется уравнением Клапейрона – Менделеева. Здесь M – молекулярный вес (молярная масса), R – универсальная газовая постоянная, равная

$$R = 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Уравнение (4.9a) получено Б. Клапейроном* в 1834 г, и обобщено позднее Д. Менделеевым (он ввел универсальную газовую постоянную R).

4.1.3. Распределение Максвелла

Вследствие хаотичности движения и соударений скорость молекул характеризуется набором случайных чисел, как по направлению, так и по абсолютной величине (теоретически от $-\infty$ до $+\infty$). Следовательно, для количественной характеристики такой совокупности частиц можно использовать методы математической статистики и теории вероятностей.

Одна из задач описания системы в терминах МКТ формулируется так: сколько молекул dN_v обладает скоростью в интервале значений $v \div v + dv$, или какова вероятность $f(v)$ того, что скорость молекулы окажется в этом интервале?

* Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (*Benoît Paul Emile Clapeyron*) – французский физик и инженер.

Функция вероятности $f(v)$ вводится следующим образом:

$$f(v) = \frac{dN_v}{Ndv}, \quad (4.10)$$

где N – общее число молекул, dN_v – число молекул, значение скоростей которых попадает в интервал значений $v \pm dv$.

Поскольку общее число молекул равно

$$N = \int dN_v = \int_0^{\infty} N f(v) dv, \quad (4.10a)$$

то

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1. \quad (4.10b)$$

Это так называемое условие нормировки функции распределения, означающее, что в бесконечном наборе значений скорости всегда найдётся молекула, которая обладает заданной скоростью.

Опустим вывод этой функции распределения, называемой распределением Максвелла по скоростям, и приведём лишь конечное выражение:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right). \quad (4.11)$$

Число молекул в заданном интервале значений скорости $v \div v + dv$ определяется формулой

$$dN = N f(v) dv = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) dv. \quad (4.12)$$

На рис. 4.5, где графически представлено распределение Мак-

велла, отмечены характеристические скорости распределения: наиболее вероятная v_B , среднеквадратичная $\langle v^2 \rangle$ и средняя $\langle v \rangle$ скорости молекул – (а) и вид распределения Максвелла в зависимости от массы молекул и температуры – (б).

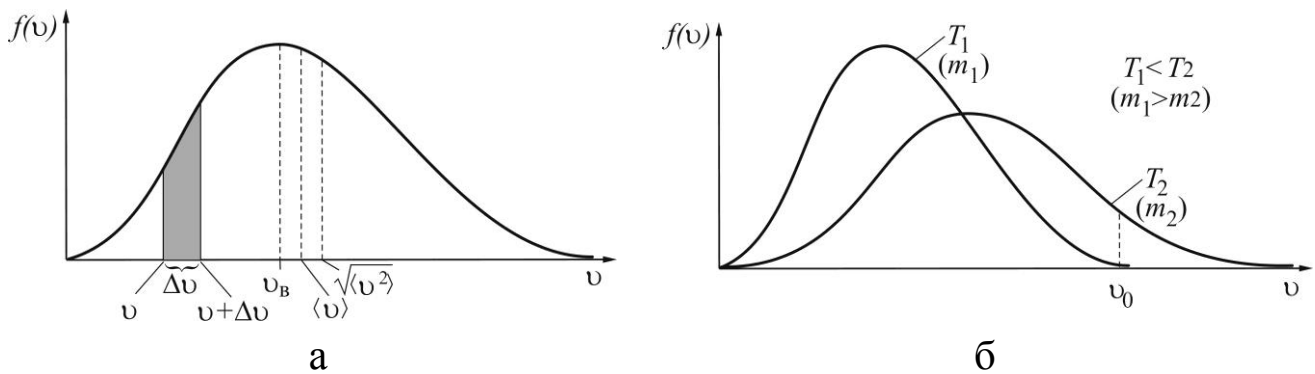


Рис. 4.5. а) – Графическое представление распределения Максвелла по скоростям, где обозначены характеристические скорости молекул: наиболее вероятная скорость v_B , среднеквадратичная $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ и средняя $\langle v \rangle$; б) – распределение Максвелла для разных значений массы молекул и температуры

Наиболее вероятная скорость v_B соответствует максимальному значению функции вероятности $f(v)$ и находится из условия:

$$\frac{\partial f(v)}{\partial v} = 0. \quad (4.13)$$

Решение этого уравнения даёт значение наиболее вероятной скорости

$$v_B = 1,4 \sqrt{\frac{kT}{m}}. \quad (4.13a)$$

Среднее значение квадрата скорости $\langle v^2 \rangle$ и средняя скорость $\langle v \rangle$ определяются как

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv \quad \text{и} \quad \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v f(v) dv, \quad (4.136)$$

соответственно. Их численные значения связаны с параметрами компонент газа следующими соотношениями:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = 1,73 \sqrt{\frac{kT}{m}}, \quad \langle v \rangle = 1,60 \sqrt{\frac{kT}{m}}. \quad (4.13в)$$

При нормальных условиях средняя скорость молекул кислорода равна 500 м/с, водорода – 2000 м/с.

4.1.4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

Из уравнения Клапейрона–Менделеева (4.9а) следует, что давление $p = nkT$, где n – концентрация молекул газа в сосуде. Предсказать такой вид зависимости можно было бы на основе здравого смысла, проделав простой опыт. Представьте себе, что вы надуваете футбольный мяч, и чем больше вы вдуете туда воздух, тем труднее это вам даётся. Зависимость от концентрации очевидна: количество воздуха увеличивается, а размер мяча (объём) практически неизменен, поскольку мяч выполнен из плотного упругого материала. Далее вы выставляете мяч на солнце или в прохладное место. В первом случае мяч немного раздувается, становится более упругим, поскольку стенки более напряжены из-за повышенного давления. Во втором случае мяч несколько «сдувается», теряет упругость, т.е. давление уменьшается. Вариаций таких экспериментов множество. Совершенно очевидно, что $p \sim nT$. Главный вопрос заключается в определении механизма такой эмпирической зависимости давления от концентрации молекул и температуры. Покажем, что такую зависимость можно предсказать, т.е. теоретически описать экспериментально установленный универсальный

газовый закон, смысл которого заключён в уравнении Клапейрона–Менделеева.

Теоретическое рассмотрение базируется на представлении о том, что давление в сосуде связано с ударами молекул воздуха о стенки сосуда, в результате которых импульс молекулы меняет знак после отражения (отскока) от стенки, как показано на рис. 4.6а.

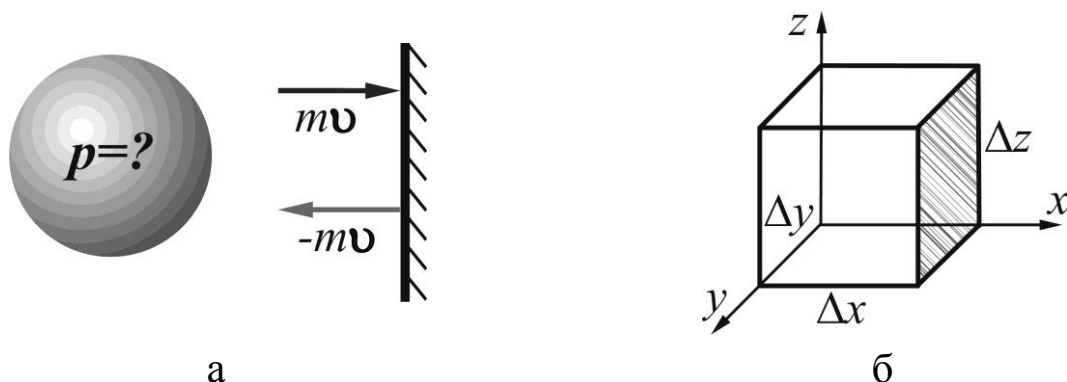


Рис. 4.6. а) – Схематическое представление изменения импульса частицы $m\mathbf{v}$ при отскоке от стенки сосуда, б) – иллюстрация модели для расчёта давления на стенку элементарного куба – грань площадью $\Delta S = \Delta z \cdot \Delta y$ (заштрихована)

Выделим мысленно в пространстве элементарный куб, рёбра которого Δx , Δy , Δz направлены вдоль соответствующих осей координат (рис. 4.6б). Естественно, молекулы хаотически перемещаются по всем направлениям. Рассмотрим только те из них, которые движутся по направлению оси x (их скорость обозначим как v_x). После удара о «стенку» (боковую грань, площадь которой равна $\Delta S = \Delta y \cdot \Delta z$) они отскакивают в обратном направлении. Изменение x -компоненты импульса одной молекулы в результате соударения равно $\Delta K_0 = 2mv_x$. Здесь m – масса молекулы. По второму закону Ньютона изменение импульса материальной точки равно импульсу действующей силы ($dK =$

$Fdt)^*$. Здесь под силой F подразумевается x -компонента силы (F_x) взаимодействия молекулы со стенкой в течение времени dt . Однако ни величина силы F_x , ни время dt нам не известны. Поэтому примем, что импульс силы $F_x dt$ равен импульсу средней силы $\langle F_x \rangle$, действующей на молекулу при её движении от «стенки» до «стенки» и обратно в течение времени Δt . Тогда $\Delta K_{0x} = F_x dt = \langle F_x \rangle \Delta t = 2m v_x$. Изменение x -компоненты импульса всех молекул после соударения о стенку ΔS равно

$$\Delta K = 2m v_x \cdot n_0 \Delta x (\Delta y \Delta z = S) = \langle F_x \rangle \Delta t = F_x \frac{2\Delta x}{v_x}, \quad (4.14)$$

где n – концентрация молекул, $\langle F_x \rangle$ – среднее значение x -компоненты совокупной силы удара о стенку всех молекул в направлении x , содержащихся в элементарном кубе $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, равное

$$\langle F_x \rangle = m v_x^2 n \Delta S. \quad (4.14a)$$

Теперь надо принять во внимание, что эта совокупность молекул подчиняется законам статистики, и молекулы имеют разброс абсолютных значений скорости. Поэтому заменим значение v_x^2 на среднеквадратичную величину $\langle v_x^2 \rangle$. Поскольку все компоненты равноправны (и давление на любую стенку – грань одно и то же), то $\langle v_x^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle$. Тогда среднее значение силы ударов совокупности молекул определяется соотношением $\langle F \rangle = \frac{1}{3} n m \langle v^2 \rangle \Delta S$, и давление на любую грань равно

$$p = \frac{\langle F \rangle}{\Delta S} = \frac{1}{3} n m \langle v^2 \rangle = \frac{2}{3} n \frac{\langle m v^2 \rangle}{2} = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{пост.}} \rangle, \quad (4.14б)$$

где $\langle E_{\text{пост.}} \rangle$ – среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекул. Это и есть основное уравнение молекулярно-

* Поскольку для обозначения давления ранее было выбрано p , во избежание путаницы, обозначим импульс буквой « K ».

кинетической теории (МКТ). Постулируется, что средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа равна $\langle E_{\text{пост.}} \rangle = \frac{3}{2} kT$ (см. Раздел 5.1). Тогда уравнение 4.14б можно представить в виде

$$p = nkT, \quad (4.15)$$

где k – постоянная Больцмана. Уравнение (4.15) трансформируется в уравнение Клапейрона – Менделеева умножением левой и правой его частей на объём моля газа V_m , а именно:

$$V_m p = V_m nkT = kN_A T = RT.$$

Если газ состоит из молекул разного сорта i , то:

$$n = \sum n_i,$$

где n_i – концентрация молекул сорта i , и тогда суммарное давление определяется соотношением:

$$p = n_1 kT + n_2 kT + \dots + n_i kT = \sum p_i, \quad (4.16)$$

именуемым законом Дальтона. Здесь $p_i = n_i kT$ – парциальное давление данного сорта газа, т.е. давление, оказываемое i – сортом газа.

4.1.5. Барометрическая формула. Распределение Больцмана

Следующая задача МКТ – определение распределения молекул в потенциальном поле сил. Это можно сделать в обобщённом виде. Рассмотрим более наглядный способ на примере распределения молекул атмосферного газа с использованием уравнения состояния газов. Изначально принимаем, что распределение Максвелла не нарушается

в поле силы тяжести. Выделим мысленно в столбе воздуха элементарный бесконечно малый объём в виде цилиндра высотой dh и основанием площадью dS , как показано на рис. 4.7.

Очевидно, что давление p в произвольном горизонтальном сечении этого цилиндра определяется вышележащими слоями воздуха. Т.е. с увеличением высоты dh давление уменьшается на величину dp согласно соотношению

$$dp = -\rho g dh, \quad (4.17)$$

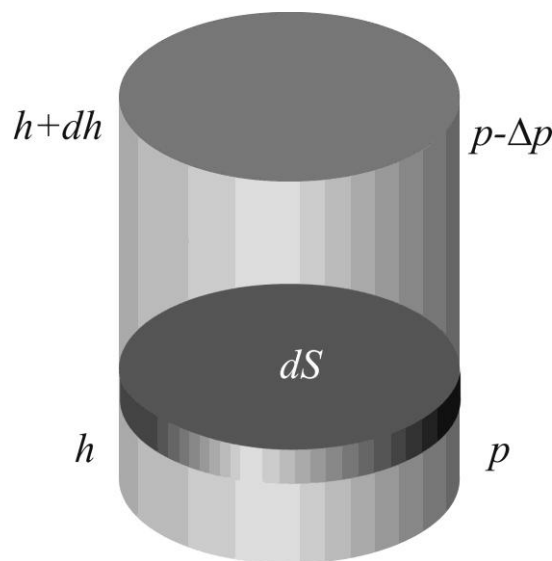


Рис. 4.7. Иллюстрация к выводу барометрической формулы

поскольку вес слоя dh над элементом сечения dS на высоте $h + dh$ равен $\rho dS dh$, где ρ – плотность газа ($\rho = F/S_{\perp}$, см. раздел 2.1).

Согласно уравнению Клапейрона – Менделеева плотность газа определяется соотношением $\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$. Тогда уравнение (4.17) можно переписать в виде:

$$dp = -\frac{pMg}{RT} dh. \quad (4.17a)$$

Полагая, что изменениями ускорения свободного падения g и температуры с ростом высоты можно пренебречь (см. разделы 1.2.4 и 4.3, соответственно), решение этого дифференциального уравнения в разделённых переменных можно представить в виде:

$$p = C \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right). \quad (4.176)$$

Константа интегрирования C – это давление воздуха на высоте $h = 0$, т.е. на уровне поверхности земли, $p(0)$. Таким образом, давление воздуха на высоте h равно

$$p(h) = p(0) \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right). \quad (4.18)$$

Это и есть барометрическая формула. Воспользуемся соотношением $p = nkT$ и получим выражение для концентрации молекул воздуха на высоте h , $n(h)$:

$$n(h) = n(0) \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right), \quad (4.19)$$

где $n(0)$ – концентрация молекул на высоте $h = 0$, $E_n = mgh$ – потенциальная энергия молекулы массой m_0 в поле силы тяжести. Но таково распределение частиц в любом поле консервативных сил, т.е. в любых потенциальных полях. Оно, как отмечалось выше, может быть получено в обобщённом виде и называется распределением Больцмана в потенциальном поле. Очевидно, что барометрическая формула является её частным случаем. Выражение $n \sim \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)$ – называют Больцмановским фактором.

Используя закон Дальтона, легко получить выражение для концентрации молекул атмосферного воздуха, состоящего из разных сортов газа, в зависимости от высоты h :

$$n_i(h) = n_i(0)e^{-\frac{m_i gh}{kT}} \quad (4.19a)$$

или

$$n_i(h) = n_i(0)e^{-\frac{M_i gh}{RT}}, \quad (4.19б)$$

где m_i и M_i – молекулярная и молярная массы газов (компонентов атмосферного воздуха).

Барометрическая формула определяет распределение компонентов атмосферного газа, особенности функционирования организма человека в условиях высокогорья или глубоководных погружений. Поэтому эти вопросы выделены в самостоятельные подразделы.

4.2. Физические свойства атмосферы

Рассмотрим характеристики только ближайшего к земле слоя атмосферы – тропосферы, точнее, слоя до высоты 10 км. Длительное пребывание на этой высоте в открытой атмосфере смертельно опасно. Примерно до такой высоты, как уже отмечалось, поднимаются пролетные гуси. В Приложении 3 приведены высоты, на которых встречаются различные виды животного мира, в Приложении 4 – насекомые. В тропосфере содержится 80% массы всего атмосферного воздуха (хотя по объему она составляет всего около 1% всей атмосферы) и около 90% всей атмосферной воды (условно принято считать, что граница атмосферы расположена на высоте 100 км над уровнем моря). Это основной источник ветров, облаков, дождей и снегов. Состав атмосферы представлен на рис. 4.8.

Состав этих газов практически постоянен, за исключением углекислого газа (CO_2), содержание которого непрерывно увеличивается. Кроме приведённых на рис. 4.8 газов, в атмосфере содержится вода в виде паров, взвеси капель или кристаллов льда. Количество воды непостоянно и зависит от температуры и, в меньшей степени, от давления воздуха. Атмосфера Земли также содержит в небольших количествах эко-

логически вредные компоненты: SO_2 , NH_3 , CO , HCl , NO , пары ртути Hg .

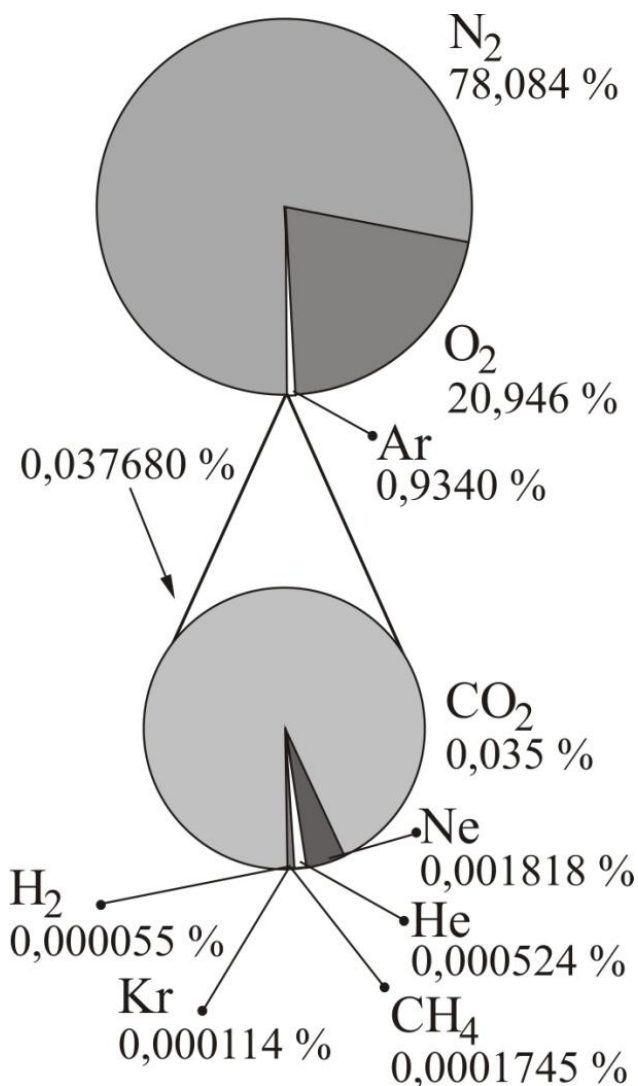


Рис. 4.8. Состав атмосферы Земли

Основная характеристика атмосферы – это температура. В приземном слое – тропосфере она падает с подъемом на высоту примерно на величину $0,65^\circ\text{C}$ на каждые 100 м. Температура на заданной высоте h (в км) приближённо определяется соотношениями: $t_h = t - 6,5 h$, ($^\circ\text{C}$) или $T_h = 273 + t - 6,5 h$, (K), где t ($^\circ\text{C}$) – температура воздуха у поверхности земли. Далее следуют такие параметры воздуха, как давление, плотность, влажность, вязкость и сжимаемость. Влажность воздуха определяется количеством воды, находящейся в воздухе. Суще-

ет понятие «относительная влажность». Это отношение массы содержащегося в воздухе водяного пара к максимально возможной при данной температуре и выражается оно в %. Понятие 0 % – условное, поскольку абсолютно сухой воздух можно создать только в лабораторных условиях. С другой стороны, 100 % влажность вполне реальна. Это означает, что достигнута предельная равновесная концентрация влаги в воздухе – насыщение: при дальнейшем понижении температуры пары воды конденсируются на поверхности предметов. Такая температура называется точкой росы. Существует совокупность базовых величин под названием «Международная стандартная атмосфера (МСА)». Она показывает изменение состояния воздуха с подъемом на высоту (табл. 4.1).

Таблицы МСА используются при градуировке пилотажно-навигационных приборов, а также для штурманских и инженерных расчетов. За основные приняты параметры состояния воздуха при нулевой влажности: давление $p = 760$ мм рт. ст. (101,3 кПа); температура $t = +15$ °C (288 К); массовая плотность $\rho = 1,258$ кг/м³ [13].

Таблица 4.1

Основные параметры атмосферного воздуха [14, с сокращениями]*

Геометри- ческая высота, h , м	Темпера- тура T , К	Давление p , Па	Плотность (ρ), кг/м ³	Скорость звука ν , м/с	Кинемати- ческая вязкость, м ² /с
0	288,150	1,01325*	1,22500	340,294	1,4607-1
250	286,525	9,83576	1,19587	339,333	1,4897
500	284,900	9,54613	1,16727	338,370	1,5195
750	283,276	9,26346	1,13921	337,403	1,5500
1000	281,651	8,98763	1,11166	336,435	1,5813
1500	278,402	8,45597	1,05810	334,489	1,6463
2000	275,154	7,95014	1,00655	332,532	1,7147
2500	271,906	7,46917	9,56954-1	330,563	1,7868
3000	268,659	7,01212**	9,09254	328,584	1,8628
3500	265,413	6,57804	8,63402	326,592	1,9429
4000	262,166	6,16604	8,19347	324,589	2,0275
4500	258,921	5,77526	7,77038	322,573	2,1167
5000	255,676	5,40483	7,36429	320,545	2,2110
5500	252,431	5,05398	6,97469	318,505	2,3107
6000	249,187	4,72176***	6,60111	316,452	2,4162
6500	245,943	4,40755	6,24310	314,385	2,5278
7000	242,700	4,11053	5,90018	312,306	2,6461
7500	239,457	3,82997	5,57192	310,212	2,7714
8000	236,215	3,56516	5,25786	308,105	2,9044
8500	232,974	3,31542	4,95757	305,984	3,0457
9000	229,733	3,08007	4,67063	303,848	3,1957
9500	226,492	2,85847	4,39661	301,697	3,3553
10000	223,252	2,64999	4,13510	299,532	3,5251

* соответствует атмосферному давлению 760 мм. рт. ст.

** соответствует атмосферному давлению 694 мм. рт. ст.

*** соответствует атмосферному давлению 467 мм. рт. ст.

* Выделены высоты, на которых начинается «горная болезнь» (~3000 м) и на которых постоянное пребывание человека не совместимо с жизнью (~6000 м).

4.3 Высотная болезнь

Высотная болезнь (высотная гипоксия) – болезненное состояние, связанное с кислородным голоданием вследствие понижения парциального давления кислорода во вдыхаемом воздухе. Оно возникает при пребывании на высотах свыше 2000 – 3000 м над уровнем моря, а также при полётах на таких высотах на летательных аппаратах, не оснащённых герметичной кабиной (например, парапланах, дельтапланах, воздушных шарах с негерметичной гондолой*).

Разновидностью высотной болезни является горная болезнь, в возникновении которой наряду с недостатком кислорода играют также роль такие усугубляющие факторы, как физическое утомление, охлаждение, обезвоживание организма, ультрафиолетовая радиация, тяжёлые погодные условия (например, ураганные ветры), резкие перепады температур в течение дня (от +30 °С днём до –20 °С ночью) и т.д. Но основным патологическим фактором горной болезни является гипобарическая (обусловленная понижением атмосферного давления) гипоксия (кислородное голодание, точнее, недостаток кислорода в тканях).

Человек способен адаптироваться к высотной гипоксии, спортсмены специально тренируют свою способность к адаптации для того, чтобы повысить спортивные достижения в равнинных условиях. Пределно возможными для длительной адаптации (часы – десятки часов) к гипоксии считаются высоты на уровне около 8000 метров. Более

* Впервые (21.11.1783 г., Париж) поднялись в небо на аэростате, наполненном горячим воздухом, Пилатр де Розье, французский физик и химик, один из пионеров авиации, вместе с маркизом д'Арландом. Они пробыли в воздухе почти 25 минут, пролетев 9,9 км и поднявшись на высоту около 1 км. Воздушный шар (монгольфьер) был сконструирован братьями Жозефом и Этьеном Монгольфье. Первый в России полет на воздушном шаре состоялся в 1803 г. (Санкт-Петербург). Однако этот полет совершил француз Жак Гарнерен на шаре, также построенном братьями Монгольфье. В начале эпохи воздухоплавания немногочисленные научные полеты выполнялись на высотах 2 – 3 км, на которых аэронавты не испытывали физического недомогания.

длительное пребывание человека на таких высотах без дыхательных кислородных приборов невозможно (летальный исход)*.

Классификация высот и характерные физиологические изменения у человека, пребывающего на разных высотах, такова:

- Промежуточные высоты (1500÷2500 м). Физиологические изменения заметны, но насыщение (сатурация) крови кислородом в пределах нормы, > 90 %; вероятность горной болезни невелика.
- Большие высоты (2500÷3500 м). Горная болезнь развивается при быстром подъёме.
- Очень большие высоты (3500÷5800 м), насыщение крови кислородом < 90 %. Наблюдается значительная гипоксемия (недостаток кислорода в крови) при нагрузке. Горная болезнь развивается часто.
- Экстремальные высоты (> 5800 м). Гипоксемия усиливается уже в покое, ухудшение состояния прогрессирует, несмотря на максимальную акклиматизацию. Постоянное нахождение на таких высотах невозможно.

* Это обстоятельство было выявлено в ходе рекордных высотных полетов. Первый из них на аэростате “Mammoth” (5.09.1862 г., Дж. Глэшер и Г. Трейси Коксуэлл, Англия) показал опасность кислородного голодания. Аэронавты, поднявшиеся на высоту 9000 м без кислородных приборов, испытали страшные страдания и избежали гибели только благодаря сильной воле Коксуэлла, сумевшего вовремя открыть газовый клапан для снижения высоты. В ходе второго полета (15.04.1875 г.) на аэростате «Зенит» (“Le Zenith”) французами Кроче-Спинелли, Сивеля и Тиссандье была достигнута высота 8600 м. Несмотря на то, что аэронавты периодически дышали запасенным в специальных баллонах кислородом, на высоте около 8000 м они потеряли сознание. Когда же шар спустился ниже, в живых остался только Тиссандье. Выдающийся русский физиолог И.М. Сеченов в своем докладе 21 декабря 1879 г. (2 января 1880 г.) на VI съезде естествоиспытателей и врачей в С.-Петербурге и последующих работах доказал, что причина гибели французских воздухоплателей «...лежит первично в очень сильно и быстро наступающем падении напряжения кислорода (парциального давления) в легочном воздухе».

Нижняя граница стратосферы (10500 м) была достигнута немцами А. Берсоном и Р. Зюрингом (31.07.1900 г.) на аэростате “Preussen” с открытой гондолой. Несмотря на то, что воздухоплатели были тепло одеты и периодически вдыхали кислород, на высоте свыше 9000 м они неоднократно теряли сознание и едва не погибли.

Высота, на которой развивается горная болезнь, варьируется вследствие влияния многочисленных факторов, как индивидуальных, так и климатических. Человеческий организм функционирует лучше всего на высоте уровня моря, где атмосферное давление равно 101,325 кПа или 1013,25 мбар (то есть равно 1 атм). Концентрация кислорода (O_2) в воздухе на уровне моря составляет 20,9 % при парциальном давлении кислорода O_2 (p_{O_2}) 21,2 кПа. У здоровых людей при этом происходит нормальное насыщение гемоглобина кислородом, который связывается с красными кровяными тельцами (эритроцитами). При подъеме на высоту около 2100 метров над уровнем моря, насыщенность организма оксигемоглобином (белком гемоглобина, связанным с кислородом) начинает падать.

Атмосферное давление убывает экспоненциально с увеличением высоты (см. уравнение 4.18). Парциальное давление p_{O_2} также убывает экспоненциально вместе с увеличением высоты. На высоте расположения базового лагеря на горе Эверест (5000 м над уровнем моря) парциальное давление p_{O_2} составляет примерно половину от давления p_{O_2} на уровне моря, и только треть на вершине Эвереста – на высоте 8848 м. Когда парциальное давление p_{O_2} падает, организм человека отвечает на это приспособительными реакциями – высотной акклиматизацией.

Алкоголь на высоте более 3000 м даже в небольших дозах уменьшает частоту дыхания и усиливает гипоксию, поэтому употребление спиртных напитков в высокогорной зоне должно быть исключено.

Итак, термином «горная акклиматизация» обозначается совокупность специфических физиологических приспособлений (адаптации), которые возникают в процессе более или менее длительного непрерывного пребывания на высоте. Эти адаптации уменьшают влияние

пониженного парциального давления O_2 во вдыхаемом воздухе на организм человека и повышают его работоспособность. Основной механизм естественной адаптации к горным условиям можно разделить на два этапа: на первом происходит усиление транспорта O_2 к тканям тела, на втором – усиление эффективности использования O_2 клетками для аэробного образования энергии. Основные факторы адаптации к условиям гипобарической гипоксии включают:

- увеличение легочной вентиляции и сопровождающие ее изменения в кислотно-щелочном равновесии в крови и других тканях;
- усиление диффузионной способности легких;
- повышение содержания эритроцитов и гемоглобина в крови, изменения на тканевом уровне.

Основные адаптационные изменения в кровеносной системе направлены на повышение ее кислородтранспортных возможностей. Акклиматизация к высоте является, по существу, адаптацией к низкому парциальному давлению O_2 и CO_2 в крови и других тканях. Высотная гипервентиляция препятствует падению парциального давления O_2 в альвеолярном воздухе и соответственно в артериальной крови. Однако степень уменьшения парциального давления O_2 в артериальной крови, наблюдаемая сразу по прибытии на высоту, остается постоянной на протяжении нескольких недель акклиматизации. При кратковременном пребывании на высоте вместе с ростом легочной вентиляции продолжает падать парциальное давление углекислого газа CO_2 в артериальной крови. Однако в результате длительной высотной акклиматизации оно повышается, что выявляется как в условиях покоя, так и особенно во время мышечной работы. Рассмотрим только третий фактор, связанный собственно с курсом медицинской физики.

Объем плазмы крови в течение первых нескольких дней пребывания на высоте уменьшается по сравнению с показателями на равнине. Поэтому увеличен показатель гематокрита, т.е. повышена относи-

тельная концентрация эритроцитов и гемоглобина в крови. Но количество эритроцитов и гемоглобина в крови повышаются не только в связи с гемоконцентрацией, вызванной потерей части циркулирующей в сосудистом русле плазмы, но и реакцией организма на гипоксию (эритропоз). В процессе дальнейшего пребывания на высоте объем циркулирующей плазмы восстанавливается до исходного («равнинного») уровня. В условиях среднегорья для этого требуется несколько месяцев.

Отметим, что гемоконцентрация и эритропоз обеспечивают поддержание нормального содержания O_2 в артериальной крови и поэтому играют важную роль в быстрой адаптации организма к гипоксическим условиям.

Далее, в начальные дни пребывания в горах усиливается также эритропоз, ведущий к истинному увеличению числа эритроцитов в крови. Оно становится заметным уже на 3 ÷ 4-й дни пребывания на высоте свыше 3000 м. Увеличивается число циркулирующих в крови ретикулоцитов и эритроцитов больших размеров. Степень увеличения общего количества и соответственно концентрации эритроцитов на высоте до 4800 м находится в линейной зависимости от высоты и длительности пребывания в горах. При увеличении высоты до 6000 м эритропоз падает. У альпинистов после нескольких дней пребывания на высоте более 7000 м содержание эритроцитов достигает $8,5 \text{ млн/мм}^3$. У жителей гор оно тем больше, чем больше высота места постоянного проживания.

Исследования показали, что снижение внешнего давления ниже 267 мм рт. ст. (это соответствует высоте 8000 м) может привести к развитию «декомпрессионных расстройств». Если внешнее давление падает до 40 мм рт. ст., то такие нарушения становятся необратимыми. Снижение внешнего давления до опасных уровней предотвращается

использованием систем герметизации кабин^{*}, специальных скафандров, гермошлемов и т.д. Установлено, что нормальная жизнедеятельность космонавта обеспечивается и при снижении общего давления до 500 мм рт. ст., при этом оптимальное парциальное давление кислорода в кабине не должно превышать 420 мм рт. ст. – большие концентрации оказываются вредными. Соотношение между общим давлением и парциальным давлением кислорода регулируется химическим путем – с помощью регенерации.

Гемоконцентрация в начале высотной акклиматизации, и более поздно наступающее истинное увеличение числа эритроцитов в циркулирующей крови приводят к повышению гематокрита и вязкости крови. Это, в свою очередь, ведет к повышению периферического сосудистого сопротивления и, тем самым, влияет на гемодинамику. Небольшие изменения содержания эритроцитов (гематокрита) не оказывают заметного влияния на вязкость крови. Только значительное уве-

^{*} Впервые идею использовать для исследования высших слоев атмосферы пилотируемые воздушные шары с герметически закрытой гондолой высказал (наряду с автоматическими беспилотными аэростатами) Д.И. Менделеев вскоре после трагического полета французских воздухоплавателей (15.04.1875 г.), выступая 7(19) октября 1875 года на заседании Русского физического общества при С.-Петербургском университете с сообщением «О температуре верхних слоев атмосферы». Он разработал программу высотных исследований и проект управляемого аэростата с баллонетом, рулями, воздушным винтом и произвел необходимые расчеты. Однако первый аэростат с герметичной гондолой (кабиной) был создан лишь много лет спустя. Тому предшествовала серия трагически завершившихся полетов на воздушных шарах с открытой гондолой: 4.05.1927 г., Х. Грей, США – 12944 м; 15.09.1928 г., Б. Молас, Испания.

Впервые реализовал идею аэростата с герметичной кабиной швейцарский физик Огюст Пиккар с целью исследования космических лучей. Им был построен аэростат FNRS1 (“Fonds Nationale de la Recherche Scientifique”). Успешный полет был совершен Пиккаром и Кипфером 27.05.1931 г. (15781 м). В СССР первый аппарат (СССР-1) совершил полет 30.09.1933.

На пилотируемых аэростатах (стратостатах) с закрытой гондолой достигнута высота 41422 м (24.10.2014 г., Роберт Алан Юстас, США). Примечательно, что Юстас покинул стратостат в специальном скафандре на этой отметке высоты, установив и мировой рекорд прыжков с парашютом.

личение их концентрации может оказывать определенное отрицательное влияние на циркуляцию крови и работу сердца.

Образование дополнительного количества гемоглобина вначале несколько задерживается по сравнению с ростом числа эритроцитов, но в процессе акклиматизации постепенно усиливается, растет концентрация гемоглобина в крови и, таким образом, повышается кислородная емкость крови. Средняя концентрация гемоглобина в эритроцитах при этом не изменяется. Повышение концентрации гемоглобина позволяет поддерживать нормальное или даже несколько повышенное содержание O_2 в артериальной крови, несмотря на уменьшение степени насыщения ее кислородом.

Увеличение числа эритроцитов и концентрации гемоглобина происходит в условиях среднегорья очень медленно. Оно тем больше, чем больше высота и длительнее пребывание на ней. На очень большой высоте концентрация гемоглобина в крови нарастает быстро и значительно. У постоянных жителей гор она составляет более 20 %. На каждые 300 м прироста высоты концентрация гемоглобина в крови увеличивается в среднем на 2,1 % у мужчин и на 1,8 % у женщин.

Кривая диссоциации оксигемоглобина в процессе горной акклиматизации смещается вправо, что облегчает снабжение тканей кислородом*.

Особенно это важно для работающих мышц. Одним из механизмов такого сдвига может быть повышение концентрации 2,3-дифосфоглицерата (2,3-ДФГ) в эритроцитах, что наблюдается у людей, постоянно проживающих в горах. Однако даже после полной акклима-

* Кривая диссоциации оксигемоглобина – это зависимость степени насыщения гемоглобина кислородом (отношение количества оксигемоглобина к количеству общего гемоглобина в %) от парциального давления кислорода. При парциальном давлении, равном нулю, в крови находится только восстановленный гемоглобин. Т.е. повышение парциального давления кислорода ведет к увеличению количества оксигемоглобина (смещение вправо по кривой диссоциации). Диссоциация оксигемоглобина зависит от ряда факторов: рН крови (увеличение приводит к росту парциального давления); в эту же сторону происходит сдвиг при повышении концентрации углекислого газа CO_2 и 2,3-дифосфоглицерата в крови, повышение ее температуры.

тизации на высоте снабжение тканей кислородом затруднено, особенно при напряженной мышечной работе, из-за сниженного парциального напряжения O_2 в артериальной крови [14а]. (Рассмотрение вопросов изменения в системе кровообращения, максимального потребления кислорода выходит за пределы данного пособия).

Влияние метеоусловий на артериальное давление. Прежде всего, на артериальное давление оказывает воздействие атмосферное давление, посредством:

- изменения давления внутри грудной и брюшной полостей;
- изменения реологических свойств и химического состава крови – вязкости, степени насыщенности кислородом*.

Воздействие на артериальное давление оказывает также и температура воздуха. В основном это сказывается на реологических свойствах крови. В меньшей степени оказывает влияние на артериальное давление влажность воздуха. Существует усредненная зависимость между атмосферным давлением и величиной артериального давления: уменьшение атмосферного давления на 5 мм рт. ст. вызывает увеличение артериального давления на 13 мм рт. ст. [14г].

Влияние авиAPERелётов на сердечно-сосудистую систему. Во время полета давление в салоне самолета приблизительно равно давлению на высоте 2500 м над уровнем моря. При снижении атмосферного давления количество кислорода в салоне самолета падает – это является основным фактором риска для повышения артериального давления, гипертонического криза и развития сердечного приступа.

Так или иначе, перепады давления в салоне самолета чувствуют

* От греч. rheos – течение, поток и logos-слово, учение, Наука о деформациях и текучести вещества. Реология крови – текучесть крови, определяемая совокупностью функционального состояния форменных элементов крови (подвижность, деформируемость, агрегационная активность эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов), вязкости крови (концентрация белков и липидов), осмолярности крови (концентрация глюкозы). Ключевая роль в формировании реологических параметров крови принадлежит форменным элементам крови, прежде всего эритроцитам, которые составляют 98 % от общего объема форменных элементов крови [14в].

все. Резкое падение атмосферного давления и снижение концентрации кислорода в салоне самолета отмечается уже на высоте 3000 м, а при длительных перелетах самолет набирает высоту до 11000 м, что резко уменьшает поступление кислорода в кровь. Ответная реакция организма – увеличение содержания эритроцитов в крови и, как следствие, увеличение ее вязкости. Для поддержания вязкости крови в норме употребляют соответствующие препараты, этому способствует, например, употребление томатного сока без соли. Даже здоровым людям, а особенно людям, страдающим заболеваниями сердца (ишемическая болезнь сердца, приступы стенокардии, перенесенный инфаркт миокарда, атеросклероз сосудов и гипертония), в полете может понадобиться дополнительная ингаляция кислородом [14д].

4.4. Влияние погружения под воду (давления) на человека *

Глубина ныряния без акваланга ограничена, прежде всего, запасами имеющегося в организме кислорода (около 2,5 л). Ныряльщику помогает и то обстоятельство, что давление воды, отжимая кровь из ко-

* Различают два вида подводного плавания. Свободное подводное плавание – фридайвинг, погружение без акваланга с задержкой дыхания (апноэ) и собственно дайвинг. Первым рекордсменом глубоководного плавания является Р. Бухер (Италия, 1949 г., 30 м). Первым 100 м отметку преодолел Ж. Майоль, Франция, 1976 г. Сегодня свободное подводное плавание – фридайвинг является массовым увлечением и видом спорта на уровне чемпионатов мира. Мировой рекорд во фридайвинге без ограничений установлен в 2017 г. Гербертом Ничем (Австрия), который за 4,5 мин достиг глубины 214 м (возвращался он очень медленно, чтобы избежать декомпрессии). Дайвинг в массовом понимании – это плавание под водой с аппаратами, обеспечивающими автономный запас воздуха (или иной газовой смеси) для дыхания под водой от нескольких минут до 12 и более часов, в зависимости от глубины, типа дыхательного аппарата и потребления ныряльщиком газовой смеси: любительский (рекреационный, до 40 м); профессиональный (водолазные работы); спортивный. Мировой рекорд погружения с аквалангом принадлежит Паскалю Бернабе, В июле 2005 года он меньше чем за 10 минут погрузился на глубину в 330 метров. Всплытие длилось 9 часов.

нечностей, увеличивает ее насыщение в легких*.

При значительно повышенном барометрическом давлении опасным для жизни становится не только кислород атмосферного воздуха, но и содержащийся в нем азот. Этот газ прекрасно растворяется в нервной ткани, вызывая сначала наркотический, а потом и токсический эффект. Азотный наркоз, или «глубинное опьянение» (*азот известен с давних пор как «веселящий газ»*), возникает обычно, если человек дышит атмосферным воздухом на глубине от 30 до 100 м. В этом состоянии он теряет контроль над собой и возможен летальный исход. Поэтому при погружении водолаза на большую глубину ему дают газовую смесь, где азот заменен гелием, который значительно хуже растворяется в нервной ткани и в крови.

В организме человека всегда растворено какое-то количество воздуха. При этом кислород, входящий в состав воздуха, участвует в окислительных процессах и непрерывно поглощается организмом, а количество азота остается неизменным.

При погружении под воду и повышении давления количество растворенного в тканях нейтрального газа (азота), входящего в дыхательную смесь, будет увеличиваться, достигая предела насыщения, который наступит при уравнивании давления растворенного газа в тканях с его парциальным давлением во вдыхаемом воздухе или газовой смеси (см. закон Дальтона, уравнения (4.16)).

Насыщение организма газами (*saturation*) и обратный процесс –

* Первый акваланг разработал и испытал в 1943 г. Жак Ив Кусто (совместно с Эмилем Ганьяном) – исследователь Мирового океана, фотограф, режиссёр, изобретатель, автор множества книг и фильмов. Известен как Капитан Кусто (фр. *Commandant Cousteau*). Рекордное погружение в жёстком скафандре (снаряжение, предназначенное для изоляции водолаза от внешней среды), в 2006 г. совершил Kellie Chouest, достигнув глубины в 610 метров – абсолютный рекорд нахождения человека под водой вне батискафа – автономного (самоходного) подводного аппарата для океанографических и других исследований на больших глубинах. Первый батискаф FNRS-2 был построен в 1948 году О. Пиккаром, создателем стратостата (FNRS-1). На батискафе «Триест» 23.01.1960 года сын О. Пиккара Жак Пиккар и Д. Уолш достигли дна Марианского жёлоба (впадины, 11 022 м).

уменьшение концентрации газов *desaturation* (гипоксия в медицинской терминологии), называемое в русском переводе для простоты «рассыщение», являются сложными процессами, так как их скорость различна для тканей организма в зависимости от кровоснабжения последних. Так, в мышечной ткани, имеющей большое количество кровеносных сосудов, эти процессы будут протекать быстрее, чем в жировой ткани, в которой мало сосудов.

Пузырьки растворенного газа не успевают переноситься кровью к легким и, увеличиваясь в объеме по мере снижения давления, могут вызвать закупорку кровеносных сосудов, что приводит к появлению болей в мышцах и суставах и к развитию опасного заболевания, называемого декомпрессионной или кессонной болезнью. Способ предупреждения этого заболевания был найден давно при спусках на малые и средние глубины. Заключается он в установлении особого режима подъема (снижении давления). Режимы подъема водолазов рассчитывают в зависимости от глубины погружения, времени пребывания под давлением и констант скорости насыщения и «рассыщения» различных тканей организма. Отметим, что с увеличением времени пребывания водолаза на глубине падает коэффициент полезного использования времени (продуктивности), который рассчитывается как отношение времени пребывания водолаза на глубине к общему времени спуска.

При спусках на большие глубины, которые проводятся с использованием для дыхания водолазов искусственных газовых смесей, из-за высоких давлений коэффициент продуктивности с возрастанием глубины продолжает уменьшаться.

Таким образом, воздействие высокого давления при водолазных спусках, особенно глубоководных, сводится, прежде всего, к необходимости проведения длительной декомпрессии, что приводит к уменьшению коэффициента продуктивности работы водолазов до очень малых величин.

Газы, входящие в состав воздуха, а также другие, которые могут быть использованы для дыхания водолазов, с повышением давления

проявляют не присущие им при нормальном давлении особые свойства воздействия на человеческий организм. При этом действие того или иного газа определяется его парциальным давлением во вдыхаемом воздухе или газовой смеси.

Из рассматриваемых газов только кислород и углекислый газ участвуют в процессе дыхания, а остальные газы, хотя и оказывают влияние на организм человека при спусках на доступные глубины, играют роль заполнителей, создающих общее давление, соответствующее глубине погружения.

Кислород. С повышением парциального давления кислорода выше величины $15,7 \div 16,7$ кПа ($1,6 \div 1,7$ кгс/см²) начинают проявляться его токсические свойства, ведущие к кислородному отравлению организма. Кислородное отравление может наступить и при значительно меньшем парциальном давлении в случаях длительного дыхания газовой смесью с парциальным давлением кислорода более 4,9 кПа (0,5 кгс/см²). Признаки этого заболевания возникают через некоторое время дыхания смесью с повышенным содержанием кислорода, причем безопасный промежуток зависит от парциального давления кислорода.

Так, при спусках под воду в регенеративном снаряжении, когда водолаз дышит чистым кислородом, пребывание на глубине 10 м допустимо до 1 ч, а на глубине 20 м – только 20 мин.

Нижний предел содержания кислорода в дыхательной смеси составляет 1,67 кПа (0,17 кгс/см²) (7,88 % при нормальном давлении). Если с целью безопасности несколько отступить от верхнего и нижнего пределов, то получим величины парциального давления кислорода $1,96 \div 14,7$ кПа ($0,2 \div 1,5$ кгс/см²), которыми ограничивается содержание кислорода при спусках на большие глубины.

Углекислый газ. Углекислый газ может оказывать токсическое действие на человеческий организм и при нормальном давлении. Содержание углекислого газа во вдыхаемом воздухе до 1 % не вызывает каких-либо болезненных явлений, при повышении содержания до 3 %

у человека появляются чувство жара, одышка и быстрое утомление. При дальнейшем увеличении содержания углекислого газа до $5\div 6\%$ нарушается сердечная деятельность и человек теряет сознание.

При повышении давления степень воздействия углекислого газа на человека определяется не его относительным содержанием (в %) в вдыхаемом воздухе (газовой смеси), а его парциальным давлением, которое в данном случае принято выражать в процентах к нормальному парциальному давлению. Если, например, при спуске водолаза на глубину 50 м ему будет подаваться воздух, содержащий 1 % углекислого газа, то парциальное давление углекислого газа в пересчете на нормальное давление на глубине будет 6 %, то есть его содержание будет недопустимо высоким.

Указанное свойство углекислого газа требует высокой степени очистки газовой смеси при глубоководных спусках. Например, при спусках на глубину 300 м газовая смесь не должна содержать более 0,03 % углекислого газа.

Азот. С повышением давления увеличивается количество растворенного в крови и тканях азота и начинает проявляться его наркотическое действие.

При дыхании обычным воздухом на глубине $50\div 60$ м, когда парциальное давление азота достигает $39,2\div 49,0$ кПа ($3,8\div 4,8$ атм.), у человека наблюдаются явления, сходные с начальной стадией алкогольного опьянения: появляются веселость и разговорчивость, ухудшается координация движений. Дальнейшее повышение давления вызывает расстройство движений, резкое падение работоспособности, бессвязность речи, зрительные и слуховые галлюцинации и, наконец, полную потерю сознания.

Степень проявления наркотического действия азота зависит от индивидуальных особенностей людей. Некоторые хорошо тренированные водолазы сохраняют работоспособность при спусках на воздухе до глубин $80\div 90$ м, а другие теряют ее уже на глубине $50\div 60$ м.

Описанное свойство азота делает его непригодным в качестве компонента дыхательной смеси для глубоководных спусков. Потребовались поиски другого газа для этой цели. Таким газом стал гелий, нашедший широкое применение.

Гелий. Глубина, на которой воздействие гелия становится наркотическим подобно азоту, точно не установлена. Предел погружения с использованием гелия, или, как принято именовать, «гелиевый барьер» лежит на глубинах 600÷1000 м.

Однако на использование гелия в качестве заполнителя существенно влияют его физические свойства: теплопроводность и плотность. Теплопроводность гелия в шесть раз больше воздуха, что приводит к быстрому охлаждению человека при дыхании смесью, содержащей гелий, и особенно при нахождении его в гелиевой среде. Так, чтобы избежать переохлаждения тела, в гелиевых камерах необходимо поддерживать температуру до 32 °С, в то время как при нахождении в воздушной среде достаточна температура 22÷23 °С.

При спусках под воду с использованием гелия положение осложняется: тепловые потери значительно возрастают за счет того, что вода имеет большую теплопроводность, чем газы и, омывая водолаза, интенсивно охлаждает его тело. К тому же температура воды на больших глубинах низкая (0÷5 °С).

Особое значение при спусках на большие глубины имеет способность гелия искажать человеческую речь вследствие изменения характера распространения звука в гелиевой среде – речевой сигнал в гелиевой среде при давлении, соответствующем глубине 130 м, становится практически неразборчивым.

С целью повышения разборчивости речи в гелиевой среде были проведены многочисленные эксперименты по электронной обработке речевых сигналов, позволившие создать корректоры речи, которые, однако, дали только частичные результаты, и вопрос голосовой связи с водолазами при глубоководных спусках окончательно не решен.

Водород. В отличие от других газов, используемых в дыхатель-

ных смесях в качестве заполнителей, водород не является инертным и, более того, образует взрывоопасные смеси с кислородом.

Установлено, что при содержании кислорода в водород-кислородной смеси менее 4% смесь не является взрывоопасной, но остается вероятность взрыва при ее приготовлении, так как в местах смешения газов временно возникают взрывоопасные концентрации.

Указанные обстоятельства являются причиной того, что водород не находит применения при глубоководных спусках. В то же время, немногочисленные эксперименты показали возможность использования водорода в качестве заполнителя в дыхательных смесях. Ведутся разработки безопасных систем приготовления, хранения и использования водород-кислородных смесей, уже давшие положительные результаты, которые позволяют полагать, что водород найдет применение при глубоководных спусках.

Неон. Использование неона сдерживается его высокой стоимостью. Опыты показали возможность спусков с использованием неон-кислородных смесей на глубины до 200 м. При этом присущие спускам на гелиокислородных смесях большие тепловые потери и искажение речи отсутствуют. Весьма вероятно, если будут найдены недорогие способы получения неона, он найдет широкое применение при глубоководных спусках [15].

В Приложении 5 представлено распределение по глубинам обитателей морей и океанов.

РАЗДЕЛ 5. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

В предыдущих подразделах были рассмотрены явления, интерпретация которых была дана в рамках так называемой молекулярно – кинетической теории вещества. Согласно этой теории основные параметры, характеризующие физическую систему, температура T , объем V и давление p рассматриваются как параметры, связанные со свойствами частиц (молекул): массой, размерами (имеется в виду, что объем пространства, предоставленный для движения молекул, меньше, чем границы системы – сосуда), и скоростью. Для установления взаимосвязи между ними, описания свойств системы как целого и процессов, в ней происходящих, используются методы теории вероятностей и математической статистики. Однако этих макроскопических параметров недостаточно для полного описания характеристик физических систем, всего многообразия процессов и явлений природы. Эти задачи решаются методами термодинамики, где используются интегральные параметры системы вне прямой связи с характеристиками частиц, из которых образована эта система. Основу термодинамического метода составляют три начала (закона) термодинамики. Связь между интегральными характеристиками системы (вещества) и его строением устанавливается в рамках статистической физики. Термодинамический метод лежит в основе классической (равновесной) термодинамики, в рамках которого сформулирован основной закон природы – закон сохранения энергии. Краткая история его открытия дана в Приложении 6. Деятельность человека как части системы «человек и окружающая среда» невозможна без знаний классической термодинамики. Но функции человека как живого организма не могут быть описаны в рамках равновесной термодинамики. Жизнь живых организмов описывается методами неравновесной термодинамики, исходными для которой являются представления и начала классической термодинамики.

5.1. Термодинамическое состояние и температура

В предыдущих разделах широко использовался термин «температура» как само разумеющееся. Между тем, температура – важнейшая фундаментальная характеристика в физике, и ее определение в зарубежной научной литературе зачастую носит название нулевого начала термодинамики. В молекулярно-кинетической теории вещества температура отождествляется с кинетической энергией молекул или частиц, образующих физическую систему и, таким образом, устанавливается взаимосвязь статистического и термодинамического способов (методов) описания явлений в молекулярной физике.

Принимается, что для любого сорта молекул средняя кинетическая энергия их поступательного движения связана с температурой соотношением

$$\langle E_{\text{пост.}} \rangle = \frac{3}{2} kT, \quad (5.1)$$

где, как уже упоминалось ранее, k – постоянная Больцмана, и энергия любого элемента объема газа одинакова во всей системе. Такое состояние называется термодинамическим, а соответствующая ему температура T – термодинамической температурой. Очевидно, что локальная температура (температура бесконечно малого элемента объема газа) не будет меняться только тогда, когда молекулы меняются местами детально: место, освобождаемое покидающей эту локальную область пространства молекулы, тотчас занимает другая молекула (это т.н. принцип детального равновесия, широко используемый для описания кинетических процессов в условиях термодинамического равновесия). Формальная схема такого детального обмена представлена на рис. 5.1.

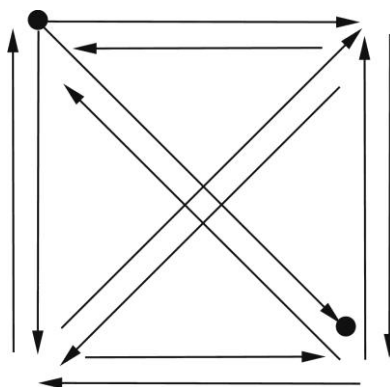


Рис. 5.1. Иллюстрация принципа детального равновесия

Предложенная (постулированная)* (уравнение 5.1) количественная связь температуры и кинетической энергии основывалась на учёте только поступательного движения молекул. Как уже отмечалось в разделе 4, для свободного газа координаты (x, y, z) и скорости молекул (v_x, v_y, v_z) равноценны. Тогда для среднеквадратичного значения скорости молекул выполняется соотношение

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle, \quad (5.2)$$

среднеквадратичные значения x, y, z – компонентов скорости в котором равны

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle. \quad (5.3)$$

Используя соотношения (5.2) и (5.3) для среднего значения энергии поступательного движения, получим выражение:

* Постулат (от латинского *postulatum* – требование), утверждение (суждение), принимаемое в рамках какой-либо научной теории за истинное, хотя и недоказуемое ее средствами. Играет в ней роль аксиомы.

Аксиома (от греческого *axioma* – принятие положения), исходное положение научной теории, принимаемое без доказательства.

Гипотеза (греческое *hypothesis* – основание, предположение), предположительное суждение о закономерной (причинной) связи явлений.

$$\langle E_{\text{пост.}} \rangle = \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (5.4)$$

Пока мы принимали во внимание, что молекула обладает только кинетической энергией поступательного движения по трем возможным направлениям движения вдоль трёх осей координат, т.е. молекула имеет три степени свободы – координаты x, y, z и соответствующие им компоненты скорости (v_x, v_y, v_z). Следовательно, энергия, приходящаяся на одну степень свободы поступательного движения, равна $kT/2$.

Но полное число независимых координат для определения положения тела в пространстве – совокупное число степеней свободы i определяется также ориентацией оси вращения молекулы и направлением вращения (вращательному движению соответствуют вращательные уровни энергии), и характером колебаний атомов молекулы (колебательными уровнями энергии). Принимается, что энергия, приходящаяся на любую степень свободы, одинакова – это так называемый закон (теорема) о равнораспределении энергии по степени свободы, и тогда полная средняя тепловая энергия молекулы определяется формулой:

$$\langle E_{\text{полн.}} \rangle = \frac{i}{2} kT. \quad (5.5)$$

Рис. 5.2 и 5.3 иллюстрируют определение числа степеней свободы молекулы в простейших случаях.

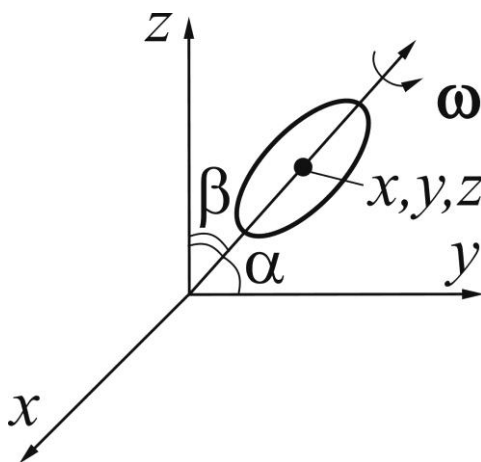


Рис. 5.2. К определению числа степеней свободы: три степени свободы поступательного движения задаются координатами центра инерции масс – x, y, z ; 3 степени свободы вращательного движения определяются двумя направляющими углами оси вращения α, β , и направлением вектора угловой скорости ω

В случае линейной молекулы, например молекулы водорода, вращением вокруг собственной оси вращения, проходящей через атомы водорода, можно пренебречь (объемная форма вырождается в линию), и число степеней свободы становится равным 5. Но добавляются 2 степени свободы, обусловленные колебаниями атомов водорода вдоль химической связи, проявляющиеся при высоких температурах (её имитирует пружина, рис. 5.3а). На рисунке 5.3б изображена механическая модель трехатомной молекулы воды, для которой необходимо учитывать и упругие колебания, вызванные деформацией валентного угла.

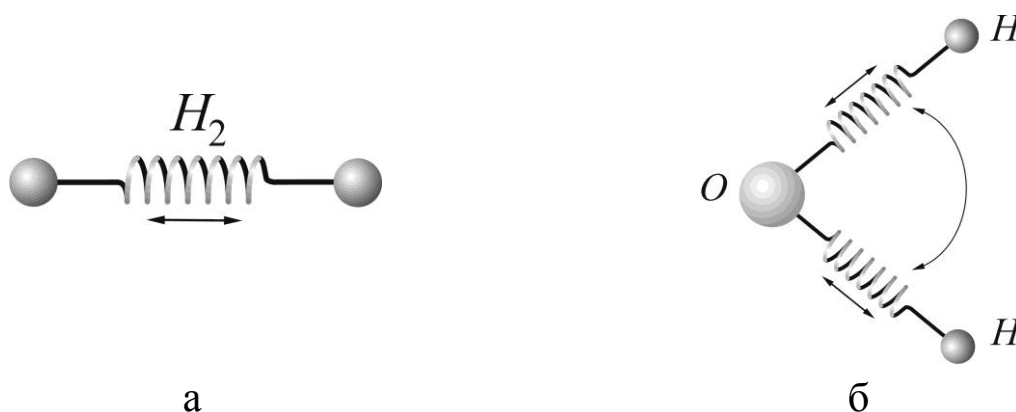


Рис. 5.3. Колебательные степени свободы: а) – для молекулы водорода, б) – для молекулы воды

В общем случае число степеней свободы молекулы равно

$$i = n_{\text{пост.}} + n_{\text{вращ.}} + 2n_{\text{колеб.}} \quad (5.6)$$

Отметим, что при учете колебательного движения молекул число степеней свободы удваивается, поскольку учитываются и кинетическая, и потенциальная энергия колебаний молекулы.

5.2. Первое начало термодинамики. Работа в изопроцессах

Внутренняя энергия

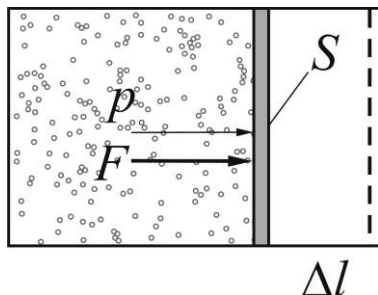
В реальном газе внутренняя энергия состоит из полной кинетической энергии невзаимодействующих молекул $U_{\text{полн.}}$, потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия $U_{\text{вз.}}$ и внутримолекулярной энергии $U_{\text{вн.}}$:

$$U = U_{\text{полн.}} + U_{\text{вз.}} + U_{\text{вн.}} \quad (5.7)$$

При изучении процессов, происходящих в физических системах на молекулярном уровне, внутримолекулярная энергия остается неизменной. Движение системы как целого также не учитывается. Таким

образом, изменение внутренней энергии определяется изменением энергии теплового движения и потенциальной энергии взаимодействия молекул: $dU = d(U_{\text{вз.}} + U_{\text{кин.}})$.

Работа по расширению газа



Работа по расширению газа определяется следующим образом (см. раздел 1.5):

$$\Delta A = F \Delta l = p S \Delta l = p \Delta V, \quad (5.8)$$

где S – площадь поршня, p – давление под поршнем. Или в дифференциальной форме:

$$\delta A = p dV. \quad (5.8a)$$

Теплота

Теплота Q – это энергия в специфической форме – форме хаотического молекулярного движения. Совокупность микроскопических процессов (т.е. захватывающих не все тело сразу, а только отдельные группы молекул), приводящих к передаче энергии от тела к телу – от одной части к другой, называется теплообменом. Теплота, передаваемая системе, расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы (и, наоборот, при совершении над системой работы изменяется внутренняя энергия и выделяется тепло):

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A \Rightarrow \delta Q = dU + \delta A. \quad (5.9)$$

Это и есть формулировка первого начала термодинамики, которое в дифференциальной форме записывается в виде:

$$\delta Q = dU + p dV. \quad (5.10)$$

Математические операторы – символы, обозначающие бесконечно малое приращение (изменение) δ и d , имеют разный смысл. Передаваемое тепло (как будет показано далее) и совершаемая работа (было показано ранее) в общем случае зависят от того, каким образом это осуществляется. Поэтому принято использовать символ δ . Изменение внутренней энергии зависит только от начального и конечного состояний системы, поэтому его обозначают как dU . В интегральной форме первое начало термодинамики записывается следующим образом:

$$Q = U_2 - U_1 + A, \quad (5.10a)$$

где Q – переданная системе теплота, в результате чего изменяется внутренняя энергия системы ($U_2 - U_1$) и совершается работа A .

Теплоемкость

Теплоемкость – физическая характеристика вещества, определяемая количеством тепла, необходимого для изменения температуры моля, или произвольной массы m вещества на один градус. Различают теплоемкости при постоянном объеме или давлении (т.е. соответствуют изопроцессам), молярные и удельные. Ниже приведена сводка обозначений (число молей $\nu = m/M$, где m – масса вещества, M – молярная масса):

– молярная теплоемкость при постоянном объеме C_V , $V=\text{const}$:

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V; \quad (5.11a)$$

– молярная теплоемкость при постоянном давлении C_p , $p=\text{const}$:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p; \quad (5.11b)$$

– удельная теплоемкость при $V=\text{const}$, c_V :

$$c_V = \frac{1}{M} C_V = \left(\frac{\delta Q}{mdT} \right)_V; \quad (5.11\text{в})$$

– удельная теплоемкость при $p=\text{const}$, c_p :

$$c_p = \left(\frac{\delta Q}{mdT} \right)_p = \frac{1}{M} C_p. \quad (5.11\text{г})$$

Для моля идеального газа $U_{\text{вз.}} = 0$, $U = \frac{i}{2}RT$, ($R = kN_A$). Отсюда из определения теплоемкостей (5.11а – 5.11г) следует, что

$$C_V = \frac{i}{2}R, \quad (5.12)$$

$$C_p = \frac{i}{2}R + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R, \quad (5.13)$$

$$C_p - C_V = R - \text{формула (закон) Майера.} \quad (5.14)$$

Работа, совершаемая в изопроцессах.

Приведем основные формулы для определения работы, совершаемой в изопроцессах при расширении произвольной массы газа. В общем случае работа вычисляется по формуле

$$A = \int_1^2 \delta A = \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (5.15)$$

где V_1 – начальный, V_2 – конечный объемы газа.

Нетрудно показать, что работа газа, совершаемая в изобарическом (изобарном) ($p = \text{const}$) процессе, равна:

$$A = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1), \quad (5.15a)$$

в изотермическом ($T = \text{const}$) процессе

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{M} RT \frac{dV}{V} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (5.15b)$$

Очевидно, при изохорном (изохорическом) процессе (Изо – V) работа не совершается, поскольку $dV = 0$.

Адиабатический процесс

Адиабатическим процессом (см. рис. 5.4) называется процесс, совершаемый без теплообмена с внешней средой ($\delta Q = 0$). Тогда первое начало термодинамики примет вид:

$$dU + p dV = 0. \quad (5.16)$$

Поскольку внутренняя энергия моля газа равна $U = \frac{i}{2} RT$ и $dU = \frac{i}{2} R dT$, то уравнение (5.16) можно записать в виде:

$$\frac{i}{2} R dT + p dV_m = 0 \quad (5.16a)$$

или, используя уравнение Клапейрона–Менделеева (4.9б),

$$\frac{i}{2} R dT + RT dV_m / V_m = 0. \quad (5.16b)$$

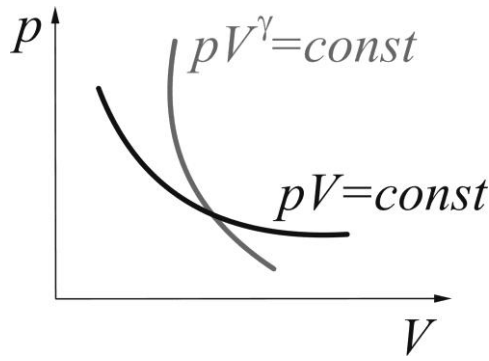


Рис. 5.4. Графическое представление изотермического и адиабатического процессов

Решением этого дифференциального уравнения в разделённых переменных является уравнение Пуассона

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.} \quad (5.16\text{в})$$

Вновь используя уравнение Клапейрона–Менделеева, получим уравнение адиабаты в более распространённом виде:

$$pV^{\gamma} = \text{const.} \quad (5.16\text{г})$$

Здесь $\gamma = C_p / C_V$ – так называемый показатель адиабаты. Элементарная работа моля газа, совершаемая в адиабатическом процессе, равна

$$\delta A = p dV = -dU = -\frac{i}{2} R dT = -C_V dT. \quad (5.17)$$

Полная работа моля газа при переходе из состояния 1 в состояние 2 определяется выражением:

$$A_{12} = - \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = -C_V (T_2 - T_1) = C_V (T_1 - T_2) \quad (5.17\text{а})$$

или в расчёте на произвольную массу газа m :

$$A_{12} = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2). \quad (5.17\text{в})$$

В общем случае процессы при произвольных значениях теплоёмкости C (политропные процессы) описываются уравнением политропы

$$pV^n = \text{const}, \quad (5.17\text{г})$$

где n – т.н. показатель политропы:

$$n = \frac{(C - C_p)}{(C - C_V)}. \quad (5.17\text{д})$$

5.3. Второе и третье начала термодинамики

5.3.1. Принципы построения тепловых машин

Рассмотрим тепловую машину – периодически действующий двигатель, который совершает работу за счет тепла, получаемого извне. Графически рабочий цикл тепловых машин представлен на рис 5.5. При направлении процесса по часовой стрелке система получает теплоту Q^+ извне (от нагревателя при температуре T_H) и переходит из состояния 1 в состояние 2. Далее система возвращается в исходное состояние, отдавая часть теплоты Q^- во внешнюю среду (холодильник, T_X , отрицательное «-» значение теплоты). В идеальной машине это – обратимый цикл, в котором передача тепла от нагревателя к холодильнику и обратно происходит без потерь тепла (т.е. в точках 1 и 2 теплообмена нет, $\delta Q = 0$). Воспользуемся уравнением, описывающим первое начало термодинамики $\delta Q = dU + p dV$. Интегрирование по замкнутому контуру ($\oint \delta Q = \oint p dV$) приводит к уравнению

$$Q^+ + Q^- = A, \quad (5.18)$$

поскольку $\oint dU = 0$ (система вернулась в исходное состояние, т.е. в состояние с тем же значением внутренней энергии).

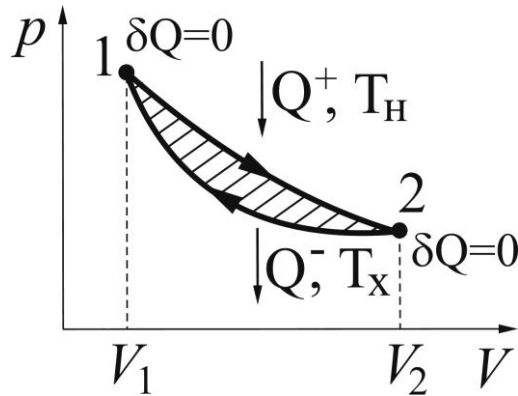


Рис. 5.5. Графическое представление работы тепловой машины

Для определения эффективности работы тепловой машины вводится величина, называемая коэффициентом полезного действия η и определяемая как отношение произведенной работы A (графически это заштрихованная область на диаграмме $p(V)$, представленной на рис. 5.5.) к полученной теплоте Q^+ :

$$\eta = \frac{A}{Q^+} = \frac{Q^+ + Q^-}{Q^+} = 1 + \frac{Q^-}{Q^+}. \quad (5.19)$$

В процессе, происходящем в обратном направлении, система работает как холодильная машина (холодильник).

Тепловая машина Карно

Идеальная обратимая машина работает по циклу Карно, который включает в себя две адиабаты и две изотермы: (1-2) при $T_1 (=T_H)$ и (3-4) при $T_2 (=T_X)$ (рис. 5.6). При изотермическом процессе, согласно первому началу термодинамики, вся теплота переходит в работу. Адиабаты (2-3 и 4-1) обеспечивают контакт рабочего тела с резервуарами без по-

терь тепла. Таким образом, в тепловой машине Карно минимизированы потери тепла, т.е. коэффициент полезного действия (к.п.д.) такой машины максимальный.

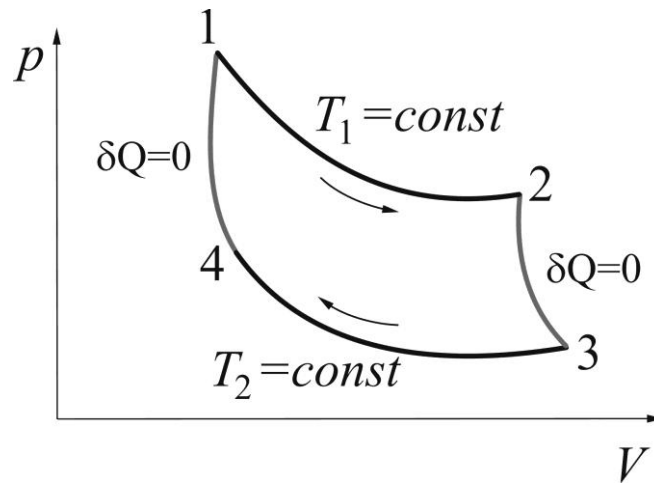


Рис. 5.6. Графическое представление цикла Карно

Расчет К.п.д. η цикла Карно дает значение

$$\eta = \frac{Q^+ + Q^-}{Q^+} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (5.20)$$

где Q^+ — количество теплоты, полученное рабочим телом (газом) от нагревателя; Q^- — количество теплоты, переданное рабочим телом холодильнику; T_1 — температура нагревателя; T_2 — температура холодильника.

5.3.2. Второе начало термодинамики. Энтропия

Законы термодинамики развеяли многовековую мечту человека построить вечный двигатель. В истории физики можно найти множество примеров устройств, которые, на первый взгляд, таковыми являются. Казалось бы, согласно первому закону термодинамики можно всю полученную теплоту преобразовать в работу. Но дело в том, что возвращаясь по изотерме T_1 в исходное состояние 1 ($dU = 0$), машина не со-

вершит никакой работы, а возвращение в исходное состояние по изотерме T_2 сопряжено с отдачей тепла. Таким образом, невозможно построить периодически действующую машину, которая совершала бы работу большую, чем подводимое ей извне тепло (вечный двигатель первого рода). Это утверждение представляет собой 1-ое начало термодинамики.

Из рассмотрения цикла Карно следует, что для построения тепловой машины необходимы два тепловых резервуара и рабочее тело (оно и обеспечивает перенос тепла от одного резервуара в другой). Это так называемый *принцип Карно* построения тепловых машин, составляющий суть второго начала термодинамики, которое было сформулировано и другими основоположниками термодинамики, как невозможность построения вечных двигателей второго рода.

Принцип Клаузиуса: невозможен циклический процесс, единственным результатом которого была бы передача тепла от менее нагретого тела к более нагретому телу.

Принцип Кельвина: невозможен циклический процесс, единственным результатом которого является производство работы и обмен теплотой с одним тепловым резервуаром. Превращение некоторого количества теплоты должно сопровождаться передачей тепла холодильнику.

Все эти утверждения, по существу, идентичны.

Необратимые процессы. Неравенство Клаузиуса. Энтропия

Перейдем к количественным формулировкам второго начала термодинамики, которое основывается на утверждении Клаузиуса о том, что коэффициент полезного действия необратимой тепловой машины η_n всегда меньше коэффициента полезного действия обратимой машины Карно η_0 :

$$\eta_n < \eta_0. \quad (5.21)$$

В общем случае:

$$\eta \leq \eta_0, \text{ или } \eta \leq 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \frac{Q^+ + Q^-}{Q^+} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (5.21a)$$

После несложных преобразований получим т.н. неравенство Клаузиуса

$$\frac{Q^+}{T_1} + \frac{Q^-}{T_2} \leq 0. \quad (5.22)$$

Т.е. в изолированной системе сумма приведенных теплот $\frac{Q}{T}$ для циклического процесса меньше нуля (для необратимого процесса) или равна 0 (для обратимого процесса). В обобщенном виде оно записывается следующим образом:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0. \quad (5.22a)$$

Рассмотрим обратимый циклический процесс, для которого $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$. Тогда бесконечно малое изменение приведённой теплоты $\frac{\delta Q}{T}$ можно заменить дифференциалом функции состояния S ($\frac{\delta Q}{T} = dS$ или $\delta Q = TdS$), называемой энтропией. Итак, в циклическом обратимом процессе, происходящем в замкнутой изолированной системе, $\oint dS = 0$.

Это можно показать другим способом. Разобьём замкнутый цикл на две обратимые ветви I и II (рис. 5.7):

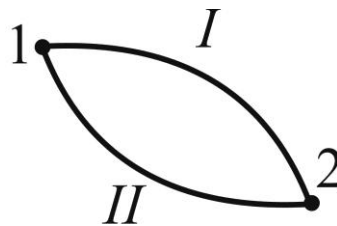


Рис. 5.7. Изображение циклического обратимого процесса, состоящего из двух обратимых ветвей I и II

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1_I}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2_{II}}^1 \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \text{и} \quad \int_{1_I}^2 \frac{\delta Q}{T} = - \int_{2_{II}}^1 \frac{\delta Q}{T} = \int_{1_{II}}^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (5.22б)$$

Из условия (5.22б) следует, что приведенная теплота $\frac{Q}{T}$ не зависит от способа перехода из одного состояния в другое, т.е. является функцией состояния. Тогда изменение энтропии при переходе из состояния 1 в состояние 2 определяется соотношением

$$\int_1^2 dS = S_2 - S_1. \quad (5.22в)$$

Очевидно, что $\oint dS = 0$.

Теперь представим себе циклический процесс, включающий в себя необратимый участок «Н» (рис. 5.8), в котором система вначале необратимо переходит из состояния 1 в состояние 2, а затем обратимо возвращается в исходное состояние, т.е. в целом циклический процесс является необратимым.

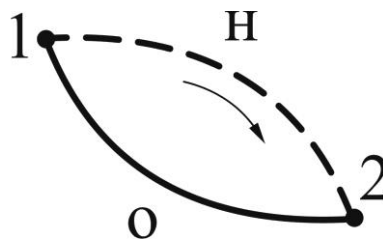


Рис. 5.8. Представление циклического процесса, включающего обратимый «О» и необратимый «Н» участки

Воспользуемся неравенством Клаузиуса для необратимого циклического процесса (ур-е 5.22а):

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad \text{или} \quad \int_{\frac{1}{H}}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{\frac{2}{0}}^1 \frac{\delta Q}{T} < 0. \quad (5.22\Gamma)$$

Первый интеграл относится к необратимому процессу, поэтому с учётом соотношения (5.22в) уравнение (5.22г) запишется в виде:

$$S_1 - S_2 + \int_{\frac{1}{H}}^2 \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad \text{или} \quad S_2 - S_1 > \int_{\frac{1}{H}}^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (5.22\text{д})$$

Для изолированной системы $\delta Q = 0$ и тогда:

$$S_2 - S_1 > 0. \quad (5.23)$$

Итак, в изолированных системах энтропия либо не изменяется (в обратимых процессах), либо возрастает (в необратимых процессах). Это утверждение называется законом неубывания (возрастания) энтропии или вторым началом (законом) термодинамики, который в дифференциальной форме записывается следующим образом:

$$dS \geq 0. \quad (5.24)$$

Отметим, что все процессы природы необратимы. Этот фундаментальный закон означает, что все процессы в природе идут с возрастанием энтропии, достигая максимального значения, когда система находится в равновесном состоянии. Т.е., второе начало термодинамики указывает на направление процесса.

5.3.3. Статистическое представление энтропии. Теорема Нернста, третье начало термодинамики

Состояние системы как совокупности молекул можно задать с помощью макроскопических параметров: объема, температуры, давления, внутренней энергии, энтропии и т.д. Однако это, т.н. макроскопическое состояние, можно задать и другим способом – посредством характеристик всех его молекул (например, в модели идеального газа посредством их координат и скоростей (импульсов)). Такое состояние называется микроскопическим. Число различных микросостояний, соответствующих макросостоянию, называется термодинамической вероятностью или статистическим весом. Термодинамическая вероятность принципиально отличается от привычного понятия «вероятность». Поясним это на простом примере. Возьмем кубик с пронумерованными гранями 1,2,3,4,5,6 (например, кость в игре нарды). Вероятность того, что после подбрасывания выпадет какая – либо из этих цифр, равна $1/6$. Это, т.н. частотная вероятность. Если грани немеченные, то у тела кубической формы 6 одинаковых способов расположиться на поверхности игровой доски, у тетраэдра – 4, у шара – бесконечное множество. Соответственно термодинамическая вероятность (здесь более подходит термин «статистический вес») равна 6, 4 и бесконечности (определение статистического веса с учетом свойств симметрии – обычный прием в статистической физике). Теперь перейдем к модели молекулярной системы. Представим себе плоскую квадратную коробку, дно которой разделено ячейками с невысокими стенками, которая моделирует плоскую координатную сетку. Поместим в нее пронумерованные шарики (нумеруем, чтобы можно было проследить за перемещением конкретного шарика, поскольку на перемещение требуется время). Глубину и размеры ячейки выбираем так, чтобы шарики легко перекатывались и, расположившись в ячейке после прекращения перемещения, слегка соприкасались. Разместим теперь в ко-

робке столько шариков, сколько их расположится на расстоянии примерно 30–40 ячеек друг от друга. Таким образом, мы построили механическую модель идеального газа. Естественно, чем больше ячеек и шариков – тем точнее модель отражает свойства этой статистической системы. Очевидно, что все ячейки равноценны и вероятность размещения шарика в любой из ячеек одинакова. Каждый набор ячеек с шариками (они же помечены!) – одно из возможных микросостояний макросистемы, которые равновероятны. Это утверждение носит название постулата равновероятности микросостояний. Поместим теперь коробку с шариками на вибростенд и, после каждой процедуры перемешивания шаров, будем фиксировать их положения в ячейках. Число таких размещений (термодинамическая вероятность), имитирующих микросостояние, будет, естественно, зависеть от общего количества шариков. Теперь проведем простенький эксперимент. Мысленно разделим квадрат на две равные части. Разместим внутри коробки 4 пронумерованных шарика, накроем коробку прозрачной крышкой, и далее будем многократно перемешивать шарики и подсчитывать после каждой процедуры перемешивания, какое количество шариков окажется по ту или иную сторону разделительной полосы. Результат совпадет с предсказанным на основе законов статистики расчетом.

Событие 1. Все шарики расположатся в левой половине коробки: есть только один способ такого расположения, которому соответствует термодинамическая вероятность (обозначим ее символом Γ), равная 1.

Событие 2. Слева три и справа один шарик (3:1): имеются 4 такие комбинации (шары меченые!) $\Gamma = 4$.

Событие 3, по два шарика с каждой стороны: 6 способов, $\Gamma = 6$.

Событие 4, один шарик слева, три справа, $\Gamma = 4$.

Событие 5, все шарики расположены в правой половине коробки, $\Gamma = 1$.

Суммарная термодинамическая вероятность Γ равна 16.

Всего комбинаций с размещением 4 меченых шаров $16 (2^4)$. Вероятность первого события $1/16$, второго $1/4$, третьего $1/6$, четвертого $1/4$, пятого $1/16$. Это частотные вероятности событий. Их сумма равна 1. Это означает, что какое-то из этих событий совершится обязательно. Очевидно, чем больше шариков (событий), тем меньше вероятность события, когда все шары окажутся на одной половине. И тем больше вероятность события, когда по обе стороны разделительной полосы будет примерно одинаковое число шариков, т.е. количество таких комбинаций (термодинамическая вероятность) будет наибольшей. Продолжим рассуждения. Изначальное расположение шаров по одну из сторон коробки – единственное расположение – нарушается при перемешивании, и оно самопроизвольно не может быть достигнуто. Стало быть, это неравновесное состояние, из которого система переходит в равновесное состояние, которому соответствует максимальное число способов его реализации (максимальная величина термодинамической вероятности). Теперь установим взаимосвязь со вторым началом термодинамики.

В равновесном состоянии $\Gamma = \Gamma_{max}$. Система из неравновесного состояния переходит в равновесное состояние, т.е. $\Gamma \rightarrow \Gamma_{max}$. Но по второму закону термодинамики энтропия в необратимых процессах, протекающих в изолированных системах, возрастает и достигает своего наибольшего значения, т.е. $S \rightarrow S_{max}$. Т.е. между величиной Γ и энтропией S имеется логическая связь, устанавливаемая формулой Больцмана:

$$S = k \ln \Gamma. \quad (5.25)$$

Далее, при гипотетической остановке молекулярного движения, чему должна была бы соответствовать температура $T = 0$, имеется только единственный способ реализации состояния, т.е. $\Gamma = 1$. Тогда справед-

ливо утверждение, что при стремлении температуры к абсолютному нулю* ($T \rightarrow 0$), энтропия стремится к нулевому значению:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0. \quad (5.26)$$

Это утверждение и есть третье начало термодинамики, называемое также теоремой Нернста. Оно устанавливает ограничения для тепловых процессов. Поскольку для количественных расчётов важнее разность значений функции состояния S (см. уравнение 5.22в), то за начало отсчёта можно взять состояние, которому соответствует $S = 0$. Тогда энтропия при некоторой температуре T равна

$$S = \int_0^T dS = S_T. \quad (5.26a)$$

Отметим, что в термодинамическом смысле второй закон термодинамики абсолютен. Но он не является таковым статистически, поскольку не всегда выполняется: существуют процессы, которые обусловлены исключительно проявлением статистических свойств системы. Это многочисленные физические процессы, возникающие в ре-

* Абсолютный нуль на практике недостижим. Его существование и положение на температурной шкале следует из экстраполяции наблюдаемых физических явлений (см. раздел 4.1.2), согласно которой при абсолютном нуле энергия теплового движения молекул и атомов вещества должна быть равна нулю. Это означает, что хаотическое движение частиц прекращается, и они образуют упорядоченную структуру (жидкий гелий составляет исключение). Однако, с точки зрения квантовой физики, и при абсолютном нуле существуют нулевые колебания, которые обусловлены квантовыми свойствами частиц и физического вакуума, их окружающего.

Абсолютный нуль (ноль) – это минимальная температура, которую может иметь в пределе физическое тело во Вселенной. Она служит началом отсчёта абсолютной температурной шкалы Кельвина. Реперной является температура, соответствующая на фазовой диаграмме (см. раздел 6.4) тройной точке воды (273,16 К, 0,01 °С).

зультате флуктуаций физических параметров системы – отклонения их от средних значений, которые соответствуют равновесным значениям макроскопических параметров. Например, отклонение концентрации частиц (т.е. плотности) от равновесного значения.

5.3.4. Термодинамические функции и потенциалы

Итак, к уже перечисленным термодинамическим функциям состояния системы p , V , T , U добавляется еще одна – энтропия S . В принципе, их множество – любая функция от функции состояния также является термодинамической функцией. Но из них важно выделить т.н. термодинамические потенциалы – *определенные термодинамические функции независимых макроскопических параметров, полностью задающих термодинамическое состояние системы*. В таком случае, зная термодинамические потенциалы как функции какого-либо полного набора параметров системы, посредством дифференцирования и интегрирования можно вычислить не только остальные параметры системы, но и любые макроскопические характеристики системы и процессов, в них протекающих. В ряду приведенных выше термодинамических функций только внутренняя энергия является термодинамическим потенциалом. Отметим, что энтропия является аддитивной величиной: если система разделена на две части и каждой соответствует энтропия S_1 , S_2 , соответственно, то энтропия всей системы равна сумме энтропий ее частей $S = S_1 + S_2$.

Для описания особенностей термодинамики живых систем нам понадобится еще один термодинамический потенциал – *свободная энергия*.

Вначале, получим взаимосвязь между параметрами системы и внутренней энергией. Из первого закона термодинамики следует, что $\delta Q = dU + p dV$, а из второго $\delta Q = T dS$ (для изотермического процесса). Объединяя их в одно соотношение, получим т.н. термодинамическое тождество:

$$TdS = dU + pdV, \quad (5.27)$$

поскольку в обратимых процессах обе части этого равенства выполняются тождественно*. Отсюда следует, что:

$$dU = -pdV + TdS, \quad (5.27a)$$

и тогда:

$$-p = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S, \quad T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V, \quad (5.28)^{**}$$

т.е. для определения параметров T и p мы выбираем термодинамический потенциал – внутреннюю энергию как функцию объема и энтропии $U = U(S, V)$. Равновесному состоянию системы соответствует минимум внутренней энергии.

Запишем выражение (5.27) в ином виде:

$$pdV = -dU + TdS. \quad (5.29)$$

* Тождество (в математике) – равенство, выполняющееся на всём множестве значений входящих в него переменных.

** Термодинамические потенциалы являются функциями состояния. Поэтому приращение любого из потенциалов равно полному дифференциалу функции, которой он выражается. Полный дифференциал функции $f(x, y)$ переменных x и y определяется выражением

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x dy.$$

Поэтому, если в ходе преобразований мы получим для приращения некоторой величины f выражение вида

$$df = X(\xi, \eta)d\xi + Y(\xi, \eta)d\eta,$$

можно утверждать, что эта величина является функцией параметров ξ и η , причем функции $X(\xi, \eta)$ и $Y(\xi, \eta)$ представляют собой частные производные функции

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \xi}\right)_\eta = X(\xi, \eta), \quad \left(\frac{\partial f}{\partial \eta}\right)_\xi = Y(\xi, \eta).$$

Поскольку в изотермическом процессе $TdS = d(TS)$, то

$$pdV = -dU + d(TS) = -d(U - TS) = -dF = \delta A \quad (5.29a)$$

или
$$\delta A = -dF. \quad (5.29б)$$

Здесь F — т.н. свободная энергия Гельмгольца (Льюиса — встречается и такое название) — термодинамический потенциал, определяемый как

$$F = U - TS. \quad (5.30)$$

В интегральной форме, т.е. для перехода из начального состояния 1 в конечное состояние 2 уравнение (5.30 а) запишется в виде

$$A = F_1 - F_2. \quad (5.31)$$

Таким образом, при обратимом изотермическом процессе работа совершается за счет убыли свободной энергии F , которая играет роль потенциальной энергии. Однако уравнение 5.29б выполняется только в статическом (квазистатическом) процессе. Это модельное представление. В действительности процесс изотермического расширения протекает необратимо, поскольку совершаемая при этом работа меньше. И в общем случае

$$\delta A \leq dF \quad (5.31a)$$

или
$$A \leq F_1 - F_2. \quad (5.31б)$$

(знак неравенства относится к необратимым процессам). Это означает, что убыль свободной энергии определяет максимальную работу, которую может совершить система при изотермическом процессе.

Используя уравнения 5.27 и 5.29, дифференциал от функции со-

стояния – свободной энергии, заданной параметрами S и V , как функции $F(SV)$ можно представить в виде:

$$dF = -SdT - pdV. \quad (5.32a)$$

Параметры системы – давление и энтропия при постоянных значениях температуры и объема равны соответственно:

$$-p = \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T; \quad -S = \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V. \quad (5.32б)$$

Итак, место молекулярной физики в естествознании определяется следующим:

1. Введено понятие температуры (нулевой закон термодинамики).
2. Дана формулировка закона сохранения энергии в общем виде – 1 закон термодинамики.
3. Установлено направление процессов – 2-й закон термодинамики. Он абсолютен термодинамически и не абсолютен статистически.
4. 3-й закон термодинамики указывает на ограничение процессов.
5. В дополнение к макроскопическим параметрам p , V , T введены термодинамические потенциалы – термодинамические функции U , S , F (и другие) независимых макроскопических параметров, полностью задающих термодинамическое состояние системы.

РАЗДЕЛ 6. ФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЯВЛЕНИЯ (ПРОЦЕССЫ)

6.1. Реальные газы. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Сжижение газов

В реальных газах молекулы взаимодействуют между собой. Естественно предположить, что взаимодействие обусловлено силами притяжения и отталкивания, определяющими вид потенциальной кривой взаимодействия (рис. 6.1). Силы притяжения, т.н. силы Ван-дер-Ваальса, имеют электромагнитную природу. Проявляются они на расстояниях порядка 10^{-8} см между центрами молекул и описываются функцией

$$F(r) \sim -r^{-7}. \quad (6.1)$$

Существуют три вида сил Ван-дер-Ваальса (расположены в порядке убывания абсолютной величины): диполь – дипольные взаимодействия электрических дипольных моментов молекул (т.н. ориентационные силы); взаимодействие диполь – индуцированный диполь (индукционные силы), т.е. взаимодействие полярной молекулы с неполярной молекулой, в которой электрический дипольный момент индуцируется электрическим полем полярной молекулы; дисперсионное взаимодействие (дисперсионные силы, обусловленные электромагнитным взаимодействием электронов, вращающихся вокруг ядер атомов в электрически нейтральных молекулах). Силы отталкивания имеют квантовую природу (рис. 6.1) и описываются формулой

$$F(r) \sim r^n, \quad (6.2)$$

где $n \geq 9$. Они проявляются на расстоянии меньше 10^{-8} см.

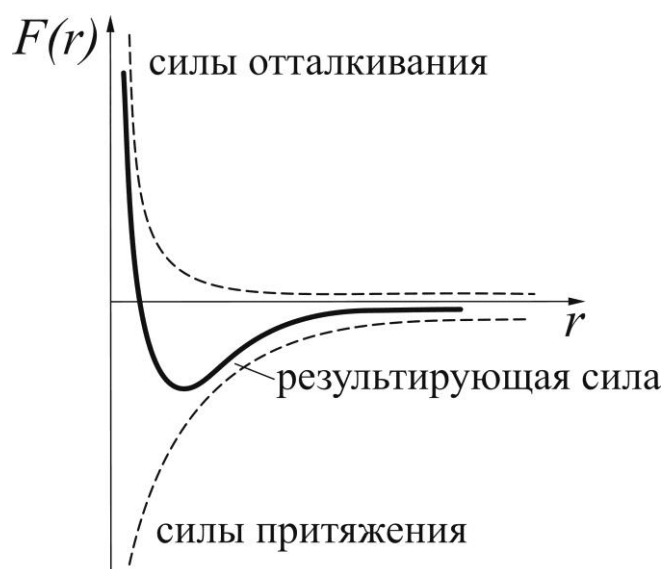


Рис. 6.1. Схематическое представление зависимости сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами

Какие экспериментальные факты указывают на то, что между молекулами существуют силы взаимодействия?

1. Зависимость средней длины пробега от температуры. Длина свободного пробега молекулы $\langle \lambda \rangle$ – среднее расстояние, которое пробегает молекула между двумя последовательными соударениями, одна из кинетических характеристик газа в молекулярно-кинетической теории. Для идеального газа она не зависит от температуры и определяется выражением

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{n4\pi r^2 \sqrt{2}}, \quad (6.3)$$

где n – концентрация молекул, r – радиус молекулы.

В модели столкновения жёстких сфер это соотношение можно получить из простых соображений (пояснения на рис. 6.2).

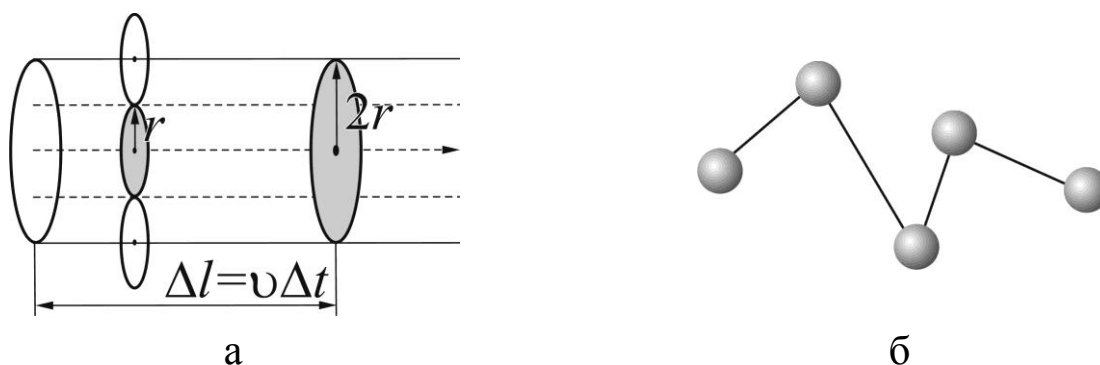


Рис. 6.2. К определению средней длины свободного пробега молекул в модели столкновения жёстких сфер

Пусть молекула движется прямолинейно со средней скоростью $\langle v \rangle$ (рис. 6.2а). За время Δt она проходит в среднем путь $\langle \Delta l \rangle = \langle v \rangle \Delta t$ и сталкивается со всеми молекулами, центры которых находятся не далее, чем на поверхности цилиндра радиусом $2r$. Площадь сечения этого цилиндра (затенено) равна $4\pi r^2$, где r – радиус жёсткой сферы с площадью сечения πr^2 (также затенено). Число таких молекул равно $\langle \Delta l \rangle \cdot 4\pi r^2 \cdot n = \langle v \rangle \Delta t 4\pi r^2 n$.

Среднее число столкновений ν в единицу времени определяется соотношением:

$$\nu = 4\pi r^2 \langle v \rangle n. \quad (6.3a)$$

В среднем, путь, пройденный молекулой в единицу времени, равен её средней скорости $\langle v \rangle$, поэтому средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ (иногда обозначают λ), была бы равна

$$\langle \lambda \rangle \equiv \lambda = \frac{\langle v \rangle}{\nu}. \quad (6.3б)$$

Однако хаотично перемещающиеся молекулы изменяют направление движения после каждого столкновения. Это означает, что при определении средней длины пробега нужно учитывать среднюю относительную скорость $\langle v_{\text{отн}} \rangle = \langle v \rangle \sqrt{2}$. С учётом этого обстоятельства для сред-

ней длины свободного пробега молекулы и получим соотношение (6.3).

В модели жёстких сфер зависимость от температуры не существует. Но в реальном газе $\langle \lambda \rangle = f(T) \sim \frac{1}{T}$, т.е. убывает с ростом температуры. Это обусловлено тем, что в действительности радиус молекулы немного больше, чем в модели жёстких сфер. Необходимо рассматривать некую молекулу с радиусом r' (рис. 6.3), определяющим минимальное расстояние, на которое могут сблизиться две молекулы, после чего они разлетаются в разных направлениях, если их энергии недостаточно, чтобы преодолеть силы отталкивания, что привело бы к образованию химической связи между ними (новой молекулы). Это минимальное расстояние определяет т.н. эффективное сечение столкновения $\sigma = 4\pi(r')^2$.

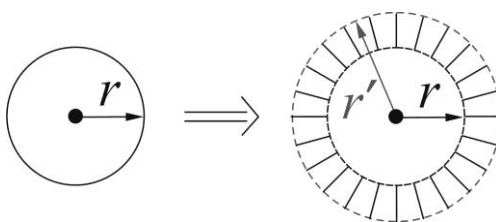


Рис. 6.3. Схематическое изображение сечения молекулы

Чем больше энергия молекул (т.е. T), тем на более близкое расстояние молекулы подходят друг к другу. Эффективное сечение столкновения σ уменьшается, т.е. среднее расстояние $\langle \lambda \rangle$ до столкновения увеличивается. Это наглядно представлено на рис. 6.4, где приведена схематически зависимость потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия от расстояния между условными центрами молекул.

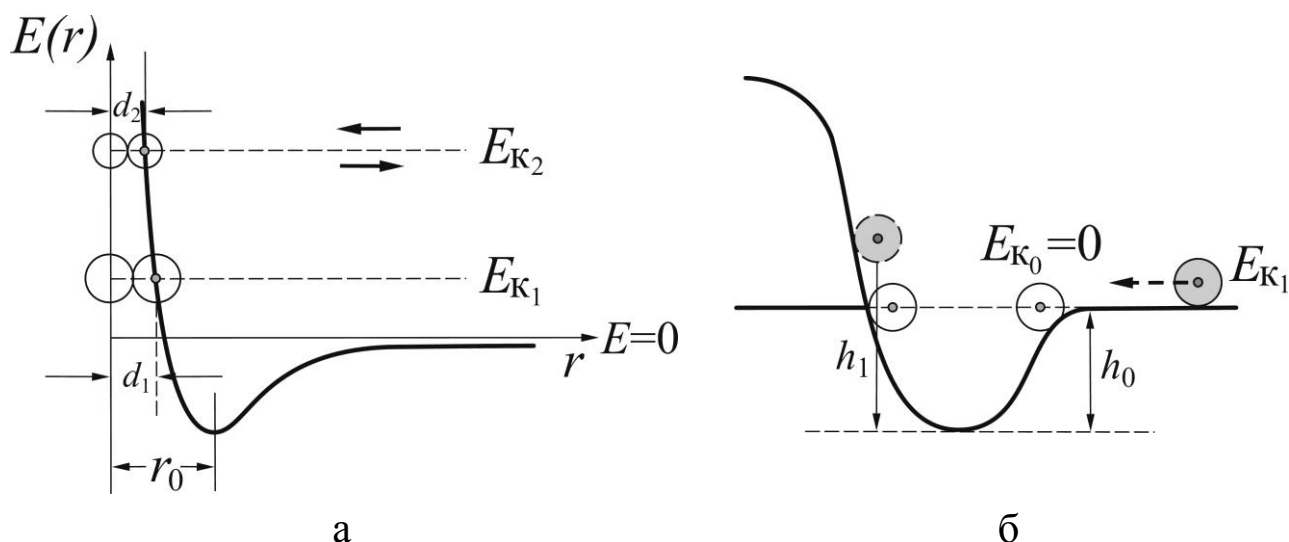


Рис. 6.4. а) – Схематическое представление потенциальной энергии взаимодействия молекул; б) – механическая модель, поясняющая степень сближения взаимодействующих молекул

Мысленно поместим одну молекулу в начало координат, а другую будем перемещать вдоль оси (направления) r . При $r > r_0$ другая молекула находится в зоне сил притяжения и стремится к сближению с нарастающей скоростью. При $r < r_0$ она входит в зону сил отталкивания и быстро теряет свою скорость до 0 при максимально допустимом сближении $d_1 = 2r'$. Чем больше запас ее кинетической энергии (т.е. выше температура системы), тем на большую высоту по потенциальной кривой молекула может переместиться или, другими словами, сблизиться на меньшее расстояние d_1 .

Можно пояснить это механическими моделями из спорта, например представленной на рис. 6.4б. Представьте себе, что нужно спуститься на лыжах со склона оврага и без дополнительных условий взобраться на его противоположную сторону. Примем, что снег на склонах оврага утопан и лыжи смазаны настолько, что потери на трение минимальны. Очевидно, что на противоположный склон вы подниметесь по инерции, если предварительно разгонитесь или начнёте спуск с максимально большой начальной скоростью, которую можно задать различными способами (например, отталкиваясь

лыжными палками). Это эквивалентно движению молекулы (затенена) из бесконечности с некоторой начальной кинетической энергией $E_{к1}$. В конце спуска кинетическая энергия будет складываться из начальной $E_{к1}$ и приобретённой за счёт потенциальной энергии mgh_0 , определяемой глубиной оврага (глубиной потенциальной ямы $E(r_0)$ при r_0 – это имитация действия сил притяжения). Если потерь энергии нет, то полная энергия, которая в начале разгона была равна $E_{к1}$, остается неизменной, и лыжник поднимется на обратный склон (имитация сил отталкивания, склон можно представить более высоким) до высоты h_1 , определяемой условием $mgh_1 = E_{к1}$.

До какого предела могут сблизиться молекулы при повышении температуры, сохраняя свою молекулярную структуру? До расстояния, сопоставимого с удвоенной величиной ковалентного радиуса молекулы ($2r_k$). При дальнейшем увеличении кинетической энергии молекул (температуры) она оказывается достаточной для преодоления энергии отталкивания (обменного взаимодействия молекул), что приведёт к образованию химической связи, т.е. образования новой молекулы, которая будет характеризоваться уже другой величиной ковалентного радиуса (размером) и ван-дер-ваальсового радиуса. Так происходит образование молекулы по механизму столкновения. Очевидно $r_k < r_0$.

В связи со сказанным, т.н. ван-дер-ваальсовый радиус r_0 – это радиус сферы эффективного межмолекулярного взаимодействия.

Для молекул воздуха: $r_0 \sim 2,5 \cdot 10^{-10}$ м, $\lambda \sim 10^{-7}$ м.

2. При больших давлениях, имеет место отклонение величины pV , которое следует из уравнения $pV_m = RT$. Например, для азота при $p = 100$ атм. отклонение составляет 7 %. Это означает, что в уравнение Клапейрона–Менделеева необходимо ввести определённые поправки. Наиболее удачно это было сделано Ван-дер-Ваальсом, имя которого и получило уравнение состояния реальных газов.

Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Рассмотрим простейшее модельное представление уравнения состояния реальных газов. Это

уравнение Клапейрона – Менделеева $pV_m = RT$, в котором надо учесть наличие сил притяжения молекул, что эквивалентно дополнительному давлению p_i ($p \Rightarrow p + p_i$). И, поскольку молекула имеет размер, объём пространства для перемещения молекул уменьшается на величину V' , ($V_m \Rightarrow V_m - V_m'$). Теперь уравнение состояния примет вид:

$$(p + p_i)(V_m - V_m') = RT. \quad (6.4)$$

При приближённой оценке поправки на объём V_m' можно исходить из принципа парного взаимодействия (рис. 6.5), согласно которому в одном акте соударения участвует только пара молекул.

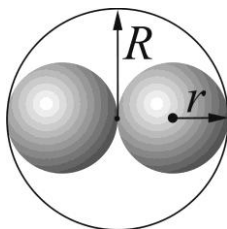


Рис. 6.5. Пояснения к принципу парного взаимодействия
 r – радиус молекулы, R – радиус сферы, в которой одновременно могут находиться только две молекулы

Объём одной молекулы $V_0 = \frac{4}{3}\pi r^3$. Как видно из рисунка 6.5, на две взаимодействующие молекулы приходится объём $V(R) = \frac{4}{3}\pi(2r)^3$, ($R = 2r$). В итоге, поправка на объём имеет порядок величины учетверённого объёма одной молекулы $V' = 4V_0$. Уравнение Ван-дер-Ваальса для моля газа с учётом поправок, приведённых выше*, приобретает следующий вид:

* Уравнение Ван-дер-Ваальса – модельное представление уравнения состояния реального газа. Газ, состояние которого удовлетворительно описывается этим уравнением, называют ван-дер-ваальсовым газом. Известны и другие модельные представления (уравнения) реального газа.

$$\left(p + \frac{a^2}{V_m}\right)(V_m - b) = RT, \quad (6.5)$$

где a , b – поправки Ван-дер-Ваальса – индивидуальные для каждого газа. Определяются они из экспериментов по сжижению газов.

Сжижение газов. Эксперимент по сжижению газов схематически представлен на рис. 6.6.

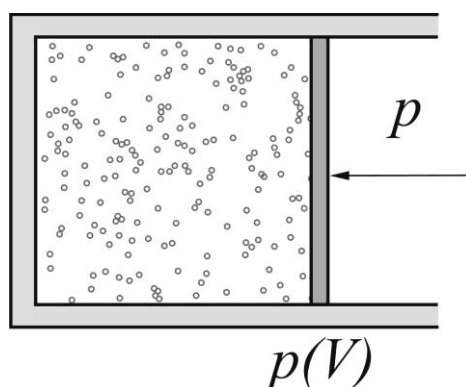


Рис. 6.6. Схема эксперимента по сжижению газов

В цилиндре под поршнем находится газ, который сжимают, перемещая поршень с большим усилием. Таким способом устанавливают зависимость между давлением, объёмом газа под поршнем (положение поршня можно регистрировать) при различных температурах, т.е. получают изотермические зависимости $p(V)$. При определённых условиях внутри цилиндра образуются капельки жидкости, т.е. образуется двухфазная система газ-жидкость, в которой устанавливается динамическое равновесие при давлении p_n , называемом давлением насыщенного (насыщающего) пара. При дальнейшем перемещении поршня давление p_n остаётся неизменным до тех пор, пока весь объём под поршнем не заполнится жидкостью. Для последующего сжатия требуются значительно бóльшие усилия, поскольку сжимаемость жидкости много меньше, чем сжимаемость газа. Такие зависимости $p = p(V)$ при разных значениях $T_1 \dots T_i$ (изотермы реального газа) приведены на

рис. 6.7. Они образуют семейство изотерм, которые разделяются т.н. критической изотермой $T_{кр}$. При $T > T_{кр}$ изотермы соответствуют газовой фазе, при $T < T_{кр}$ наблюдается двухфазное состояние. Состояние, при котором жидкая и газообразные фазы становятся неразличимыми (их плотности становятся одинаковыми), называется критическим состоянием. Критическое состояние характеризуется набором параметров $p_{кр}$, $T_{кр}$, $V_{кр}$, которые связаны с поправками a и b следующими соотношениями*:

$$V_{кр} = 3b, \quad p_{кр} = a/27b^2, \quad T_{кр} = 8a/27Rb. \quad (6.5a)$$

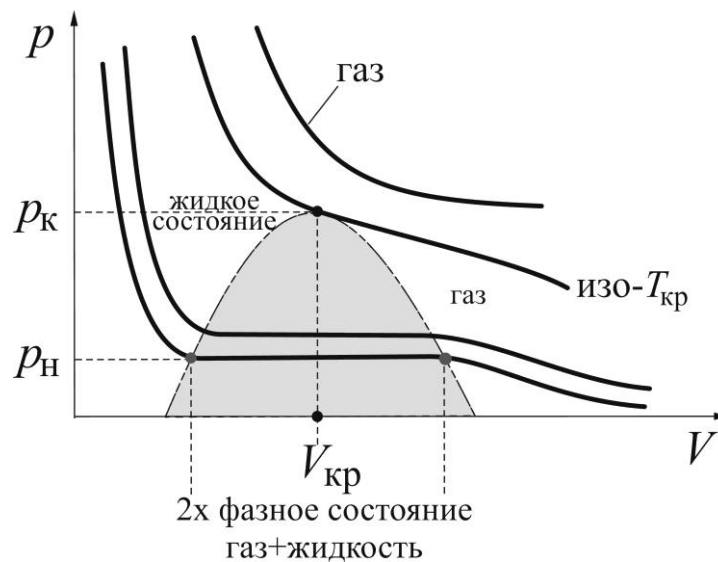


Рис. 6.7. Схематическое изображение изотерм реального газа. Область двухфазного состояния отмечена серым фоном

Отметим, что $p_{н}$ — давление насыщающего пара не зависит от объема системы $p_{н} \neq f(V)$, но зависит от температуры, т.е. $p_{н} = f(T)$.

Для воды $T_{кр} = 647,2$ К ($374,1$ °С), $p_{кр} = 218$ атм. Плотности воды и насыщающего пара в критическом состоянии одинакова и равна 329 кг/см³.

* Приведенные теоретические соотношения несколько отличаются от экспериментальных.

6.2. Структура и общие свойства жидкостей.

Поверхностные явления

6.2.1. Простейшая модель жидкости. Основные свойства жидкости

Модель Френкеля. Жидкость, в отличие от газов, можно хранить в открытом сосуде. Из этого следует, что между молекулами, образующими жидкость, существуют силы взаимодействия, достаточные, чтобы удерживать их вместе, т.е. энергия взаимодействия молекул сопоставима с энергией их теплового движения. Следовательно, тепловое движение молекул жидкости подчиняется другим законам, поскольку они уже не могут свободно перемещаться. Рассмотрим модель простой жидкости как совокупности молекул сферической формы, между которыми нет каких-либо специфических взаимодействий, а существует только взаимодействие Ван-дер-Ваальса. Эта модель была предложена Я. Френкелем.

Пусть в произвольной области пространства с координатами x, y, z находится молекула. Она совершает колебания относительно положения равновесия с некоторой частотой и пребывает в этом положении время τ_0 , называемое временем «осёдлости». Переход этой молекулы в новое положение равновесия с координатами x', y', z' может происходить только с преодолением потенциального барьера E_a , как это изображено на рис. 6.8.

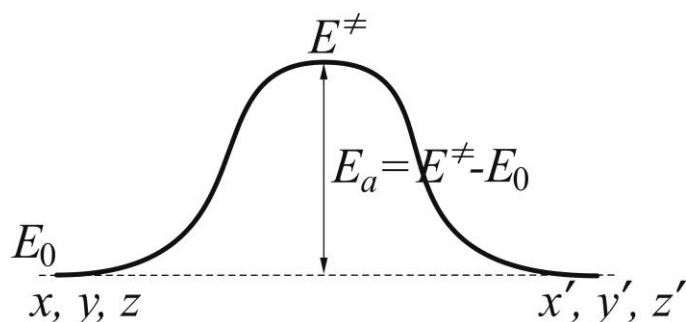


Рис. 6.8. Иллюстрация теплового движения в модели Френкеля

Любая молекула, обладающая вследствие теплового движения кинетической энергией, равной $E^\ddagger$, может взобраться на вершину этого барьера (принято обозначать значком « $\ddagger$ »), а далее может либо вернуться в исходное положение, либо с такой же вероятностью переместиться в новое положение равновесия. Теперь воспользуемся распределением Больцмана, согласно которому число молекул в потенциальном поле $E_{\text{п}}$ пропорционально $\exp\left(-E_{\text{п}}/RT\right)$. Т.е. число молекул в положениях устойчивого равновесия (x, y, z, x', y', z') пропорционально $\exp\left(-E_0/RT\right)$, а на вершине барьера $\exp\left(-E^\ddagger/RT\right)$. Молекулы находятся в динамическом равновесии и константа равновесия K между активированными молекулами (т.е. находящимися на вершине барьера – переходном состоянии) и не активированными, находящимися в устойчивом положении равновесия, определяется соотношением:

$$K = \frac{N^\ddagger}{N} = A \exp\left(-E_a/RT\right) = k, \quad (6.6)$$

где E_a – энергия активации теплового движения молекул ($E_a = E^\ddagger - E_0$), A – частотный фактор, определяющий вероятность того, что молекула, обладающая энергией E_a , пройдет этот потенциальный барьер. Согласно теории абсолютных скоростей для мономолекулярных реакций первого (псевдо первого) порядка (теория переходного состояния) константа равновесия K является константой скорости реакции (процесса) k (при этом $k = 1/\tau_0$), т.е. уравнение (6.6) можно записать в виде:

$$k = \tau_0^{-1} = A(\tau) \exp\left(-E_a/RT\right). \quad (6.6a)$$

Уравнение (6.6a) представляет собой уравнение кинетики, аналогич-

ное эмпирическому уравнению Аррениуса, в котором под предэкспоненциальным множителем A подразумевается частота столкновения молекул.

В свою очередь, τ_0 пропорционально вязкости η . Таким образом, температурную зависимость вязкости можно представить в виде:

$$\eta = B(\tau)\exp\left(E_a/RT\right). \quad (6.6б)$$

Из экспериментальной зависимости $\eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$ определяют энергию активации теплового движения жидкости. Отметим, что коэффициенты $A(\tau)$ и $B(\tau)$ испытывают температурную зависимость, но она невелика и ею, зачастую, пренебрегают.

Наличие вышеупомянутых локальных положений устойчивого равновесия можно представить графически (рис. 6.9) в виде функции распределения $G(r)$, которая показывает, какова вероятность обнаружить молекулу в окрестности другой молекулы (на рисунке она размещена в мгновенном, случайном образом перемещающемся центре координат).

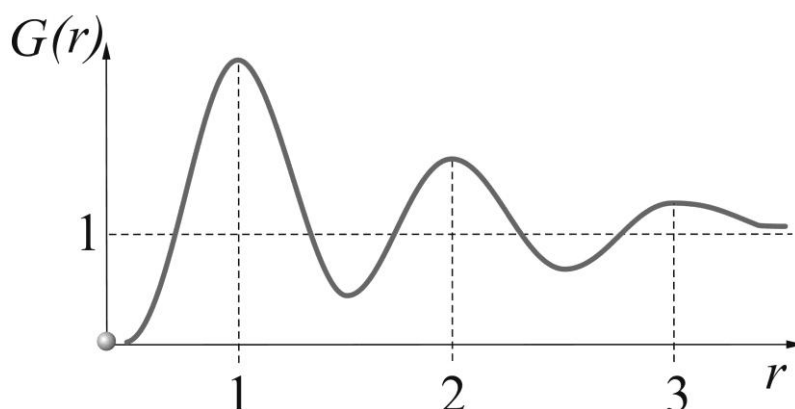


Рис. 6.9. Схематическое представление функции распределения $G(r)$,
1- 2- 3 – координационные сферы в модели Френкеля

Эксперименты показывают, что таких областей, где вероятность обна-

ружения молекулы больше 1, три. Их именуют координатными сферами. Таким образом, в отличие от газов, в жидкости имеет место т.н. ближний порядок. Очевидно, что на бесконечном удалении $G = 1$, т.е. в окружении одной молекулы всегда найдётся другая.

Основные свойства жидкости:

1. *Сжимаемость*. Характеризуется коэффициентом сжимаемости, который определяется при фиксированной температуре следующим образом:

$$\chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T, \quad (6.7)$$

где χ – коэффициент изотермической сжимаемости, V – начальный объём жидкости.

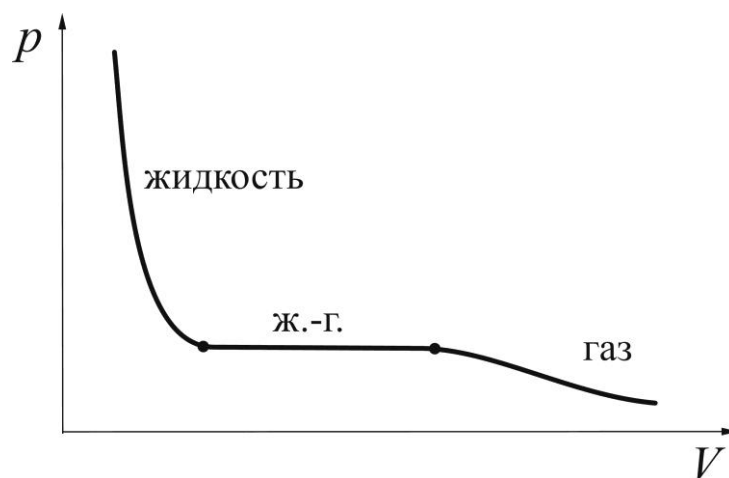


Рис. 6.10. Общий вид изотермы реального газа

Как уже отмечалось (см. раздел 2.) и как это следует из общего вида экспериментальной изотермы (рис. 6.10), сжимаемость жидкости много меньше сжимаемости газов: $\chi_{\text{ж}} \ll \chi_{\text{г}}$. Порядок этих величин таков:

$$\chi_{\text{ж}} \approx 10^{-4} \div 10^{-5} \text{ атм}^{-1}, \quad \chi_{\text{г}} \approx 1 \text{ атм}^{-1}.$$

Экспериментально установлено, что в жидкостях сжимаемость связана с поправками a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса для газа, молекулы которого образуют эту жидкость:

$$\chi_{\text{ж}} = \frac{A}{V_m \left(p + \frac{a}{V_m^2} \right)}. \quad (6.7a)$$

Выполняется это соотношение в определенном интервале давлений. Определение χ называется пьезометрией.

2. *Тепловое расширение жидкостей* характеризуется коэффициентом теплового расширения α , которое определяется при постоянном давлении следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \quad (6.7b)$$

Коэффициент теплового расширения жидкостей α пропорционален температуре, $\alpha_{\text{ж}} \approx \alpha(T)$, а в газе пропорционален обратной величине температуры, $\alpha_{\text{г}} \approx \frac{1}{T}$.

Процедура определения α называется дилатометрией.

3. *Теплоемкость жидкостей* так же, как и в газах, характеризуется величинами C_p , C_V , но соотношение Майера не выполняется, $C_p - C_V \neq R$. Для жидких металлов $C_p \approx C_V \approx 3R$ (как для твердых тел).

4. Как правило, в жидкостях имеется только одна жидкая фаза, но есть исключение – жидкий гелий (получают из газообразного гелия при $T = 4,21 \text{ К}$), который обладает свойствами классической жидкости (He I), имеющей в интервале $4,24 \text{ К} - 2,17 \text{ К}$ конечное значение вязкости; при температуре ниже $2,17 \text{ К}$ (точнее $2,172 \text{ К}$) – это квантовая невязкая ($\eta = 0$) сверхтекучая жидкость (He II).

6.2.2. Поверхностные явления

Для молекулы, находящейся внутри жидкости (см. рис. 6.11), силы притяжения со стороны других молекул в сумме равны нулю. Для молекул вблизи границы «жидкость – воздух» зона взаимодействия между молекулами жидкости заполнена не полностью, вследствие чего на них действует сила, направленная внутрь жидкости. Переход молекул из глубины жидкости на поверхность связан с преодолением этой силы. В равной степени это относится к молекулам, стремящимся покинуть жидкость в процессе испарения. Эта работа совершается за счёт кинетической энергии теплового движения молекул. Таким образом, молекулы в поверхностном слое (а значит и весь слой) обладают дополнительной потенциальной энергией. Вследствие этого жидкость стремится сократить свою поверхность. Жидкость граничит с сосудом, и на каждый элемент этой границы (контура) действует сила, равномерно распределённая по всему контуру, называемая силой поверхностного натяжения. Направлена она по касательной к поверхности жидкости перпендикулярно к линии контура этого элементарного участка границы поверхности. Количественной мерой поверхностного натяжения является величина σ , называемая коэффициентом поверхностного натяжения:

$$\sigma = F/l \quad (\text{Н/м}), \quad (6.8)$$

где l – граница контура, F – сила поверхностного натяжения.

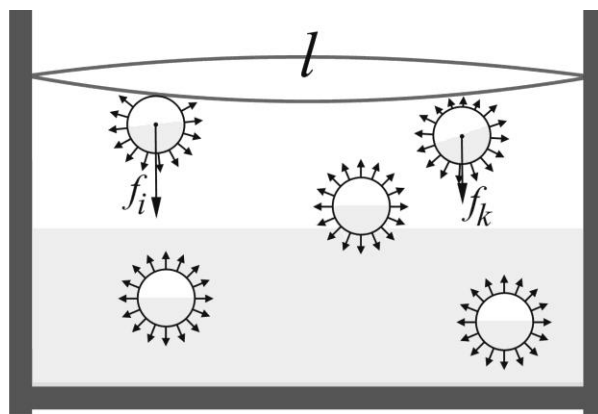


Рис. 6.11. Пояснение к возникновению сил поверхностного натяжения

Профиль поверхности жидкости зависит от соотношения сил межмолекулярного взаимодействия на границе соприкасающихся сред: стенки сосуда–жидкость ($F_{ГЖ}$), стенки сосуда–атмосферный газ ($F_{ТГ}$), жидкость–атмосферный газ ($F_{ТЖ}$). В соответствии с этим жидкости называются смачивающими и несмачивающими. На рис. 6.12 приведены профили капель таких жидкостей на горизонтальной поверхности твёрдого тела. Там же приведены направления сил, действующих на границе соприкасающихся сред.

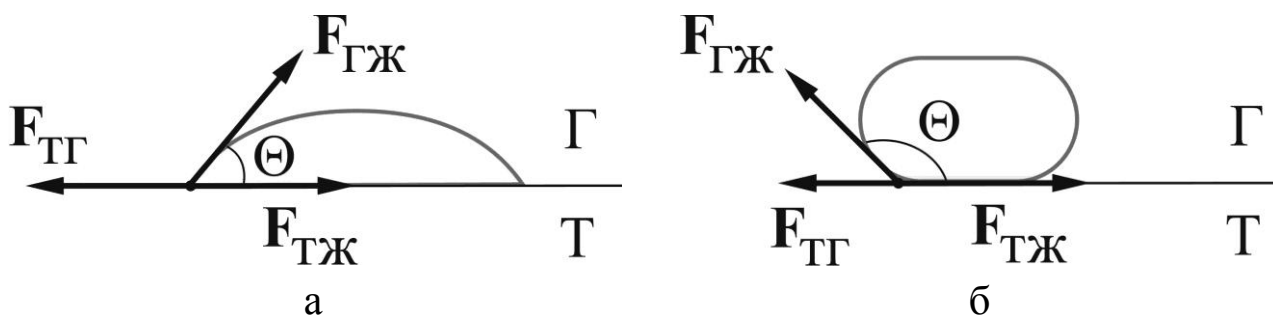


Рис. 6.12. Примеры профилей: а) – смачивающей жидкости, б) – несмачивающей жидкости

Количественной характеристикой профиля поверхностного слоя является краевой угол Θ , определяемый соотношением:

$$\cos\Theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ГЖ}}, \quad (6.8a)$$

где $\sigma_{\text{тж}}$, $\sigma_{\text{гж}}$, $\sigma_{\text{тг}}$ – соответствующие коэффициенты поверхностного натяжения на границах сред: «твердое тело – жидкость», «газ – жидкость» и «твердое тело – газ», связанные между собой неравенством $\sigma_{\text{тж}} > (\sigma_{\text{гж}} + \sigma_{\text{тг}})$. Важным следствием проявления сил поверхностного натяжения являются капиллярные явления, проявляющиеся в том, что, например, жидкость в тонкой трубке, опущенной в сосуд с жидкостью, может подниматься на некоторую высоту, если жидкость смачивающая, или наоборот, опускаться ниже уровня жидкости в сосуде за пределами трубки, если жидкость несмачивающая (рис. 6.13а и 6.13б, соответственно).

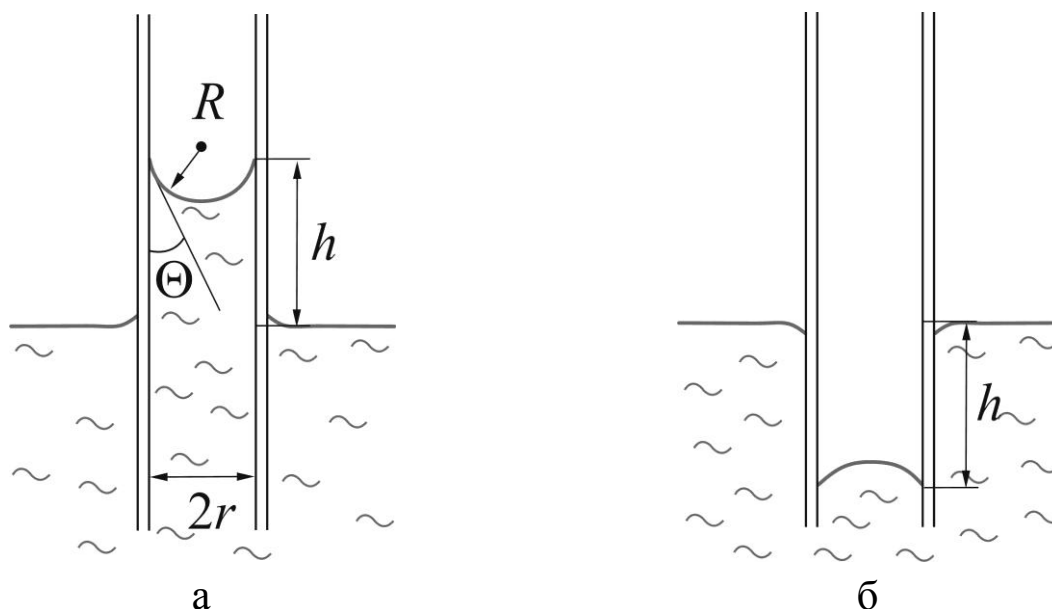


Рис. 6.13. Иллюстрация капиллярных явлений: а) – в случае смачивающей жидкости, б) – несмачивающей жидкости

В обоих случаях абсолютная величина изменения уровня жидкости внутри трубок по отношению к уровню жидкости вне трубок одинакова и определяется соотношениями:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \quad \text{или} \quad h = \frac{2\sigma \cos\Theta}{\rho g r}. \quad (6.9)$$

Проявление капиллярных свойств весьма многообразно. Наиболее типичный пример в медицинской практике – марлевые тампоны,

осушающие поверхность ранки, дренаж внутренних органов человека с их помощью после операции, забор крови с помощью тонких трубочек и т.п.

6.3. Кристаллическое состояние

Отметим, что в физике понятия «кристаллическое состояние» и «твёрдая фаза» (твёрдое тело) – синонимы. Твёрдое тело сохраняет объём и форму, следовательно, энергия взаимодействия частиц вещества много больше энергии их теплового движения, т.е. $E_{вз} \gg kT(RT)$. Известно, что все жидкости переходят в кристаллическую фазу при понижении температуры и/или повышении давления. Однако существуют т.н. аномальные жидкости (вода, сурьма, висмут), где переход жидкость – твёрдая фаза имеет свои особенности. Например, у воды в интервале 0÷4 при понижении температуры плотность не увеличивается, а уменьшается. Такое свойство воды имеет исключительно значение для живой природы. При понижении температуры окружающей среды ниже 0° С под слоем льда, образующегося на поверхности водоёма, происходит интенсивный обмен тёплых и холодных слоёв воды. По мере понижения температуры толщина льда увеличивается до определённой величины*. Если водоём до дна не промерзает, жизнь микроорганизмов и живых существ в нём сохраняется (включая придонный слой земли). Проблема лишь в недостатке кислорода в этой среде. Она решается простым путём: при необходимости сохранить жизнь обитателей мелких водоёмов во льду делают проруби или лунки.

Выделим основные признаки твёрдой фазы (кристаллического состояния):

- анизотропия физических свойств;
- молярная теплоемкость при комнатной температуре и выше равна $C_{p,v} = 3R$ (закон Дюлонга-Пти);

* Например, толщина льда в реках средней полосы Европейской части России находится в пределах 0,6–1,0 м, в реках Сибири 0,8–1,2 м, в заливах озера Байкал до 1,5–2 м.

- переход из жидкой фазы в твердую фазу совершается скачком.

Проявление таких свойств – следствие упорядочения структуры вещества, распространяющегося на все вещество в целом. Это означает, что взаимное расположение частиц вещества сохраняется во всех направлениях, образуя т.н. кристаллическую решетку, в узлах которой расположены эти частицы (рис. 6.14). Кривая потенциального взаимодействия смежных частиц имеет примерно такой же вид, как в жидкостях и газах. Очевидно, такие потенциальные кривые можно построить вдоль всех трёх координатных осей, тогда получим совокупность структурных параметров a_1 , a_2 , a_3 , называемых периодами кристаллической решетки: они соответствуют расстояниям между периодически расположенными потенциальными ямами на этих кривых взаимодействия. Разумеется, это схематическое представление структуры решётки.

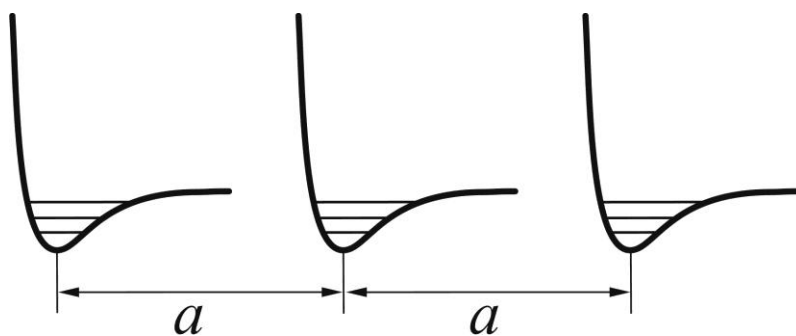


Рис. 6.14. Семейство потенциальных кривых взаимодействия между смежными элементами вещества, расположенных в узлах кристаллической решётки. Такое семейство можно изобразить и в других направлениях трехмерного пространства

Кристаллы (твердые тела) классифицируются по следующим признакам:

- свойствам симметрии (кристаллические классы);
- химическим свойствам элементов, расположенных в узлах кристаллической решетки (атомные, ионные, молекулярные кристаллы, структура металла), это т.н. физические типы кристаллов.

Мысленно любая кристаллическая решётка может быть построена из геометрических фигур (структурных элементов) путём перемещения их вдоль осей координат. Схематически её можно представить в виде мозаичной картины (рис. 6.15).

Используются понятия элементарная ячейка и примитивная ячейка. Элементарная ячейка – это структурный элемент кристаллической решётки, симметрия которого совпадает с симметрией всей кристаллической решётки. На рис. 6.15 – это шестигранник, составленный из двух типов равносторонних треугольников, различающихся цветом. Ромбические фигуры 1, 2 составлены из минимального набора выделенных фигур – это примитивные ячейки. Т.е. примитивная ячейка – это элементарная ячейка с минимальным набором химических элементов, характеризующих вещество.

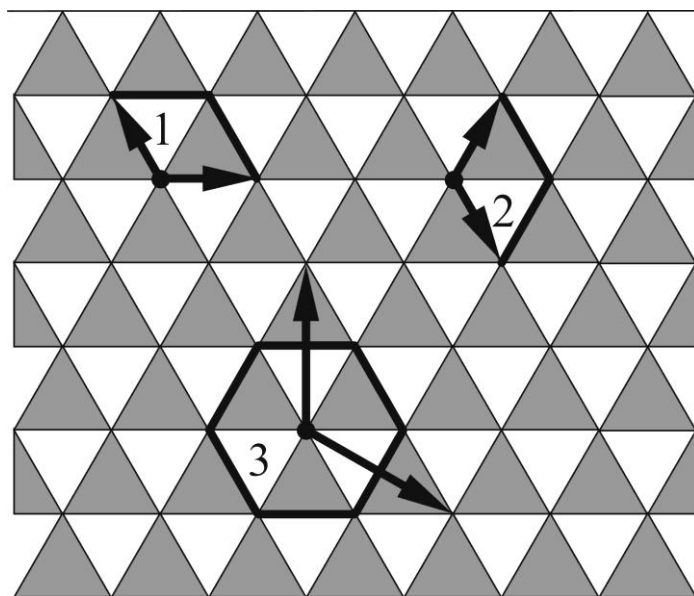


Рис. 6.15. Иллюстрация элементарной (фигура 3) и примитивных (1, 2) ячеек кристаллической решётки

В основе строгого построения кристаллической решётки лежит т.н. ячейка Браве (рис. 6.16б).

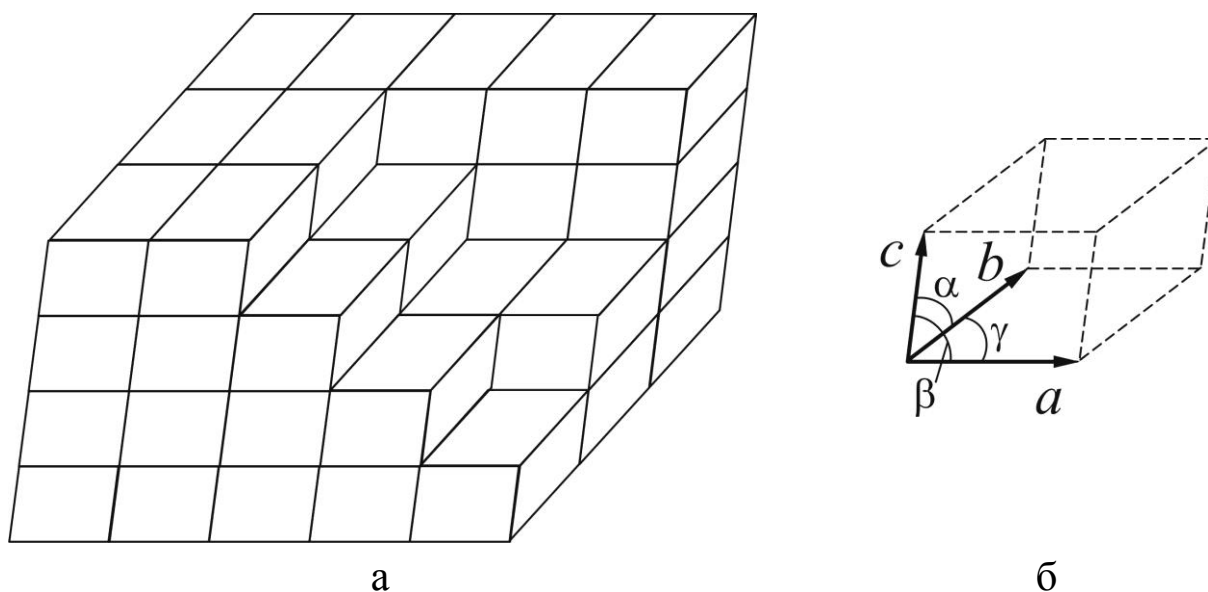


Рис. 6.16. а) – Решётка Браве, б) – примитивная ячейка Браве (a, b, c – периоды кристаллической решетки)

Более подробное рассмотрение этих вопросов выходит за рамки данного курса.

6.4. Тепловые свойства кристаллов

Рассмотрим основные тепловые свойства кристаллов.

Фазовые переходы 1-го рода жидкость – твердое тело (рис. 6.17). Проведём следующий опыт. Будем охлаждать воду в сосуде. Мерой воздействия изберём время, в течение которого будет происходить охлаждение (левый график на рис. 6.17).

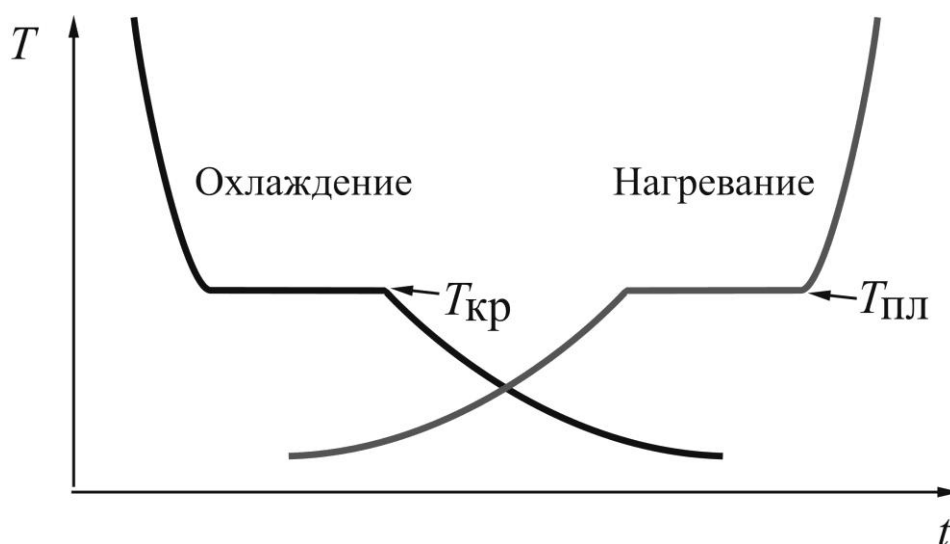


Рис. 6.17. Схематическое представление перехода вещества из жидкого состояния в твёрдое состояние и обратно в виде зависимости изменения температуры от времени по мере охлаждения или нагревания

Естественно, температура воды будет понижаться. Как только появится льдинка (льдинки), температура воды установится около 0°C . При дальнейшем охлаждении размеры льдинки (льдинок) будут увеличиваться. При этом и температура образующегося кусочка льда, и температура воды будет одна и та же. Это т.н. двухфазное состояние, при котором переход «жидкость – твёрдое тело» совершается при постоянной температуре в условиях продолжения охлаждения. После того, как вся вода превратится в лёд, температура льда начнёт понижаться, поскольку процесс кристаллизации, характеризуемый температурой кристаллизации, завершён. Теперь опустим лёд в сосуд с водой (правый график). Вода начнёт охлаждаться, а температура льда повышаться и, при температуре, называемой температурой плавления, лёд начнёт таять (плавиться). Далее доля льда будет уменьшаться, а общая доля воды увеличиваться. Вновь имеем двухфазную систему, в которой и происходит процесс плавления (переход кристаллического состояния в жидкое состояние). В ходе этого процесса температура воды и льда остаётся неизменной также вблизи 0°C .

Это т.н. фазовый переход первого рода. Его признаки:

- переход совершается скачком $T_{кр} \approx T_{пл}^*$;
- в процессе перехода обе фазы существуют одновременно;
- существует скрытая теплота фазового перехода L .

Переходы жидкость–газ (кипение, испарение, конденсация, процесс сжижения газа^{**}) относятся также к фазовым переходам I рода.

Фазовая диаграмма. Тройная точка.

Количественно фазовый переход описывается уравнением Клапейрона – Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}, \quad (6.10)$$

* Температура плавления и кристаллизации обычно несколько различаются, что обусловлено рядом факторов.

** Первая экспериментальная установка для сжижения газов была разработана в 1894 г. Камерлинг-Оннесом. Первым жидкий азот получил Джеймс Дьюар, но преимущества установки Камерлинг-Оннеса вскоре позволили ему получить в жидком виде кислород и неон и в 1906 г. жидкий водород. В 1908 г. он впервые сумел получить жидкий гелий и достичь рекордно низкой на тот момент температуры 0,9 К. Но основной целью было не достижение абсолютного нуля, а исследование свойств вещества при сверхнизких температурах, в том числе спектров поглощения элементов, флуоресценцию различных соединений, вязкость сжиженных газов и магнитные свойства веществ. В 1911 г. Камерлинг-Оннес впервые наблюдал резкое падение электрического сопротивления ртути при температуре ниже 4,1 К. Это явление получило название сверхпроводимости. В 1912 г. он также впервые получил новое состояние жидкого гелия, а в 1913 г. обнаружил разрушение сверхпроводимости сильными магнитными полями и токами. Хейке Камерлинг-Оннес (нидерл. *Heike Kamerlingh Onnes*; 21.09.1853, Гронинген – 21.02.1926, Лейден) был удостоен Нобелевской премии по физике 1913 г. с формулировкой «За исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия». Это состояние стало называться сверхтекучим после открытия в 1938 г. советским (российским) физиком Петром Леонидовичем Капицей сверхтекучести жидкого гелия при 2,172 К. Это достижение было отмечено Нобелевской премии по физике лишь в 1978 г. с формулировкой «За основные (basic) изобретения и открытия в области низкотемпературной физики». Такая формулировка объясняет, почему она была присуждена много позже, чем была присуждена Нобелевская премия также советскому (российскому) физик Л.Д. Ландау (1962 г) «За революционные теории в области физики конденсированного состояния».

где L – скрытая теплота фазового перехода первого рода, $(V_2 - V_1)$ – разность удельных объёмов двух фаз, находящихся в динамическом равновесии.

На рис. 6.18 схематически представлена т.н. фазовая диаграмма – кривая зависимости $p(T)$, разделяющая области существования двух фаз. Из соотношения (6.10) следует, что температура (точка) фазового перехода (помечена как T^* на оси T) зависит от величины давления, при котором он совершается. Это можно наблюдать в повседневной жизни и практике. В высокогорье атмосферное давление ниже, чем на равнине, поэтому вода закипает при температуре $< +100^\circ \text{C}$. В клиниках стерилизуют инструменты при температурах более $+100^\circ \text{C}$ в автоклавах – прочных ёмкостях с фиксирующимися крышками, выдерживающими достаточно высокие давления.

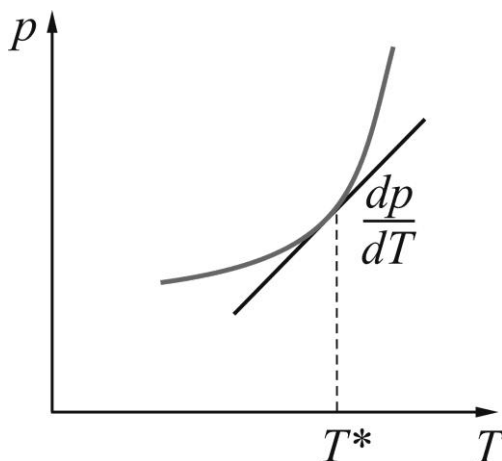


Рис. 6.18. Схематическое представление фазовой диаграммы

При определенных значениях давления и температуры в динамическом равновесии могут находиться одновременно три фазы одного и того же вещества (например, воды в виде льда, собственно воды и её паров). Это т.н. тройная точка с параметрами $p_{\text{тр}}$ и $T_{\text{тр}}$ (рис. 6.19).

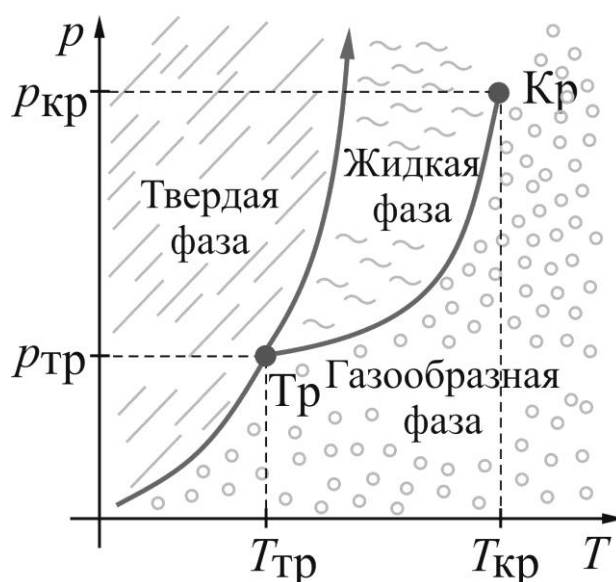


Рис. 6.19. Иллюстрация фазовых диаграмм для веществ, которые могут находиться одновременно в трёх фазовых состояниях

Фазовая диаграмма для перехода между жидким и твёрдым состояниями обрывается в критической точке (Кр). Фазовая диаграмма для перехода твёрдое тело – жидкость при высоких значениях p и T не ограничена. Из приведённых фазовых диаграмм следует, что возможен прямой переход из твёрдой фазы в газообразную фазу (и наоборот), минуя жидкую. Это явление называется сухой возгонкой, сублимацией. Хорошо известно, что мясо, рыба и некоторые продукты питания при длительном хранении в открытом виде на морозе обезвоживаются. Это явление используется в технологии обезвоживания продуктов питания для длительного хранения. Хорошо известно, что наледи на морозе быстро исчезают. До недавнего времени сушили влажное бельё и прочее на морозе. Для хранения веществ зачастую используют сухой лёд – углекислый газ CO_2 ($p_{\text{тр}} = 5,11$ ат., $T_{\text{тр}} = 216,5$ К ($-56,6$ °С)). Температура сублимации при нормальном давлении равна $-78,5$ °С.

Тепловое расширение определяется соотношением:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T, \quad (6.11a)$$

где α – коэффициент теплового расширения, равный

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}. \quad (6.116)$$

Здесь Δl – абсолютное, $\frac{\Delta l}{l_0}$ – относительное увеличение одного из размеров (геометрического параметра), например длины l , (l_0 – его первоначальное значение). В общем случае тепловое расширение вдоль произвольных направлений различается (анизотропно) и характеризуется величинами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, которые соответствуют направлениям координатных осей x, y, z . Лишь для кристаллов кубической симметрии $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$.

Теплоёмкость. Согласно закону (правилу) Дюлонга – Пти, как уже отмечалось, молярные теплоёмкости C_p и C_v любых кристаллических тел при комнатной температуре и выше одинаковы и равны $3R$ (кроме алмаза, у которого теплоёмкость равная $3R$, устанавливается при 250 К). В общем случае температурная зависимость имеет вид, представленный на рис. 6.20. Температура, при которой эта зависимость выходит на «плато», называется температурой Дебая Θ .

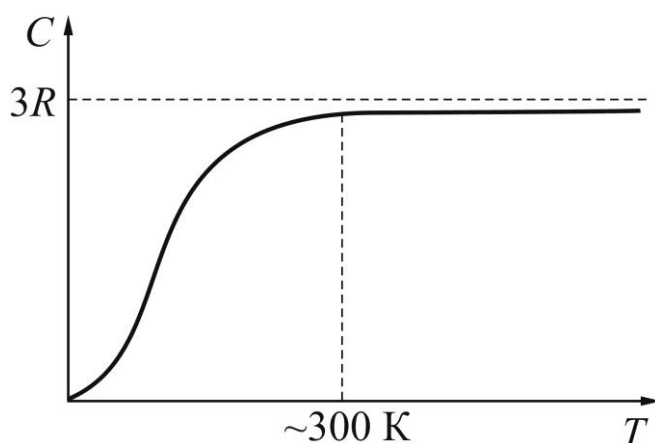


Рис. 6.20. Общий вид зависимости теплоемкости твёрдых тел от температуры

Такая экспериментальная температурная зависимость теплоемкости твёрдого тела не может быть интерпретирована в рамках классической физики, согласно которой узел кристаллической решетки (химический элемент, находящийся в узле кристаллической решетки) представляет собой гармонический осциллятор. Энергия гармонического осциллятора равна $3kT$, или в пересчете на моль вещества $3RT$, что в соответствии с формулами (5.11a) и (5.12) даёт значение теплоёмкости $3R$. Более того, она непоследовательна и даже не описывает закон (правило) Дюлонга – Пти, выполняющийся для всех кристаллических тел, как проводников, так и диэлектриков. Квантовая теория снимает эти противоречия и полностью описывает наблюдаемую в эксперименте температурную зависимость теплоемкости. Рассмотрение этого вопроса выходит за пределы данного курса. Отметим только, что согласно этой теории (модель Эйнштейна – Дебая) энергия колебаний узла решетки представляют собой набор дискретных уровней, которым соответствуют определенные частоты ее колебаний $E_{ni} = nh\nu_i$. Полная энергия решетки определяется двойным суммированием: по индексу n от 1 до бесконечности и по индексу i от 1 до m . Т.е. принимается, что спектр частот ограничивается некоторой частотой ν_m , характерной для каждого кристаллического вещества. Дискретность уровней энергии не проявляется при комнатных температурах и выше ($h\nu < kT$). Но она становится значимой ниже некоторой граничной температуры, называемой температурой Дебая Θ , определяемой из условия $h\nu_m = k\Theta$, при которой кривая температурной зависимости теплоемкости с повышением температуры выходит на «плато», которому соответствует значение молярной теплоемкости $3R$.

Природа теплового расширения и теплоёмкости одна и та же. Эта особенность кристаллов отражена в законе Грюнейзена, согласно которому отношение коэффициента теплового расширения α к молярной теплоёмкости C не зависит от температуры:

$$\frac{\alpha}{C} = \text{const.} \quad (6.12)$$

6.5. Явления переноса

Любая система, будучи выведенной из состояния равновесия, стремится вернуться в равновесное состояние. Этот процесс называется релаксацией. Как неоднократно отмечалось, система характеризуется набором параметров, например, числом частиц в некотором объёме, давлением и температурой. Следовательно, релаксация означает, что значение того или иного параметра системы со временем приходит к равновесному значению. Процесс выравнивания концентраций называется диффузией, выравнивания температуры – теплопроводностью, выравнивания скоростей потока в разных слоях жидкости или газа – вязким (внутренним) трением. Эти процессы именуют процессами переноса, поскольку они обусловлены либо переносом частиц (массы) – диффузия, либо переносом энергии – теплопроводность, либо переносом импульса – внутреннее трение. Область знаний, где устанавливают основные закономерности явлений переноса, называется физической кинетикой. Существуют разные подходы. В модельном случае, все явления можно описать в рамках МКТ вещества, используя в качестве основного параметра – среднюю длину пробега молекул $\langle \lambda \rangle$. Этот подход применяют при описании процессов переноса, как в газах, так и в жидкостях и твёрдых телах. Детальное рассмотрение этих вопросов можно найти в учебниках курса общей физики. Ограничимся лишь определением основных характеристик и соотношений на основе явлений переноса в газах.

Перенос массы (М) – диффузия (выравнивание концентрации частиц или плотности) в газе, жидкости, твердом теле (рис. 6.21). Плотность j потока компонента q вещества, переносимого за единицу времени t через ед. площади S , определяется соотношением (закон Фика):

$$j = -D \frac{dq}{dt}, \quad (6.13)$$

где $\frac{dq}{dt}$ – градиент компонента q в направлении переноса. Для диффузии закон Фика записывается в виде:

$$j = -D \frac{d\rho}{dx} = -D \frac{m dn}{dx}, \quad (6.13a)$$

где ρ – плотность газа, n – концентрация молекул массой m , D – коэффициент диффузии, $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности в направлении переноса частиц (массы).

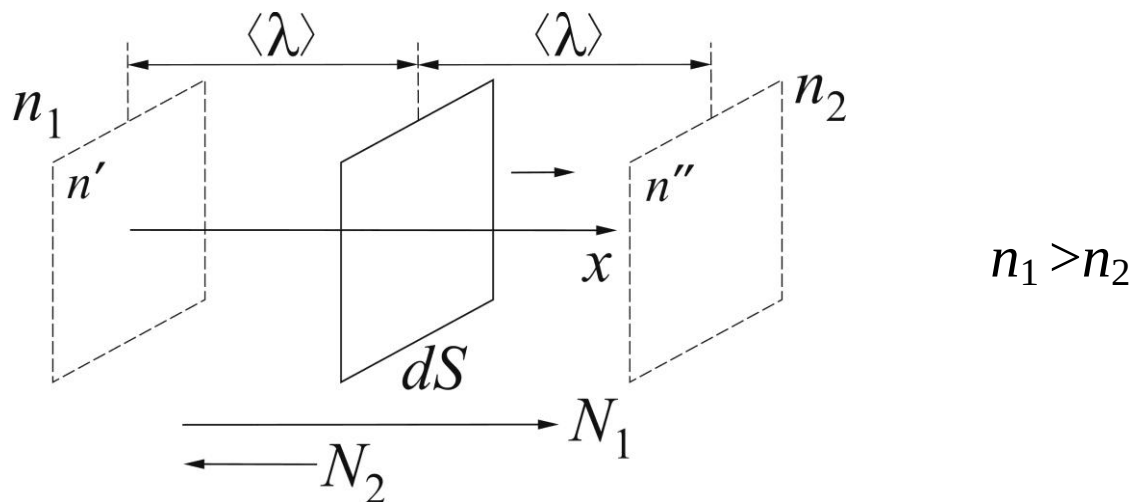


Рис. 6.21. Схематичное представление диффузии к расчёту коэффициента стационарной диффузии

Перенос числа частиц dN описывается уравнением

$$dN = -D \frac{dn}{dx} dS dt, \quad (6.13б)$$

а перенос элемента массы dM уравнением

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dS dt. \quad (6.13в)$$

Размерность коэффициента диффузии определяется соотношением $[D] = [L]^2 \cdot [t]^{-1}$. Единицы измерения $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (СИ); $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (СГС).

Оценим величину D в рамках МКТ для стационарной диффузии (наиболее важный вид диффузии для живых организмов). Это означает, что разность концентрации молекул в произвольно выбранных областях по обе стороны элементарной площадки dS не меняется со временем, т.е. $\Delta n = n_1 - n_2$ (примем для определённости, что $n_1 > n_2$ в соответствии с рисунком 6.21). Следовательно, устанавливается стационарный диффузионный поток частиц вдоль направления x , (N_1) и в обратном направлении, (N_2): $j = N_1 - N_2 = \frac{1}{6} (n' - n'')$.

Градиент концентрации определяется как:

$$\frac{n' - n''}{2\langle\lambda\rangle} = \frac{dn}{dx}, \quad \text{отсюда:} \quad n' - n'' = -2\langle\lambda\rangle \frac{dn}{dx}.$$

Согласно закону Фика

$$j = -\frac{1}{3} \langle\lambda\rangle \langle v \rangle \frac{dn}{dx}. \quad (6.14)$$

Таким образом, для коэффициента стационарной диффузии получаем значение

$$D = \frac{1}{3} \langle\lambda\rangle \langle v \rangle, \quad (6.14a)$$

подтверждающееся экспериментальными данными.

Перенос энергии (тепла Q) – теплопроводность (рис. 6.22). (Есть понятие теплоотдача – но оно характеризует другой процесс). Плотность потока энергии q определяется как

$$q = -\chi \frac{dT}{dx}, \quad (6.15)$$

где χ – коэффициент теплопроводности, $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры вдоль направления переноса тепла.

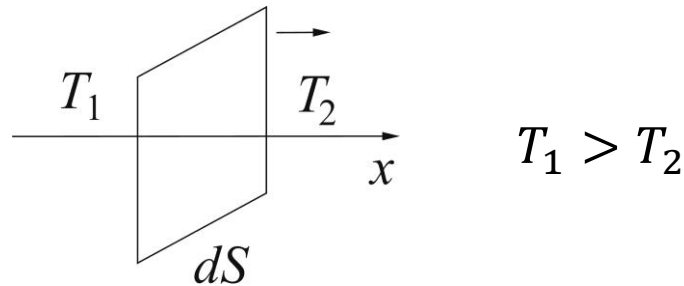


Рис. 6.22. Схематическое представление теплопроводности

Элементарное количество переносимого тепла dQ определяется уравнением

$$dQ = -\chi \frac{dT}{dx} dS dt. \quad (6.15a)$$

Полученный в рамках МКТ коэффициент стационарной теплопроводности определяется соотношением

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle C_V. \quad (6.15b)$$

Внутреннее трение обусловлено переносом импульса частиц из одного слоя движущегося потока газа или жидкости в соседний (рис. 6.23).

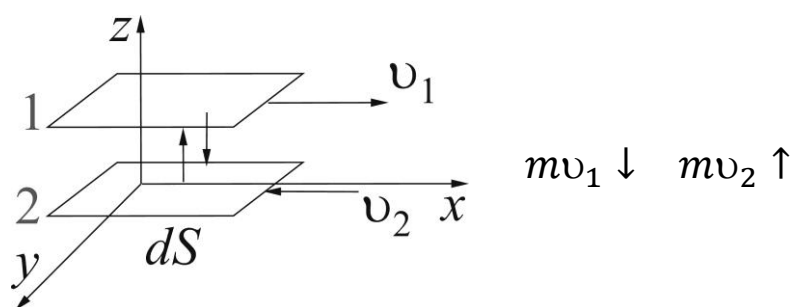


Рис. 6.23. Схематическое представление переноса импульса в потоке газа (жидкости)

Механизм взаимодействия слоёв можно представить следующим образом. Если, например, слой 1 движется относительно системы отсчёта быстрее, чем слой 2 (рис. 6.23), то молекулы, попадающие в слой 2 из слоя 1, обладая меньшим импульсом mv_2 , «тормозят» верхний слой. Молекулы, приходящие из слоя 1 в слой 2, имея большую величину импульса mv_1 , этот слой как бы ускоряют («тянут за собой»). Количественное рассмотрение в рамках МКТ приводит к выражению для сил внутреннего трения, которое согласуется с экспериментально полученной для жидкостей формулой Ньютона (см. раздел 2, уравнение 2.8). При этом коэффициент вязкости η для газов определяется соотношением

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle. \quad (6.16)$$

Явления переноса играют исключительную роль в природе. Благодаря ним обеспечиваются стационарные режимы в разнообразных процессах, обеспечивающих устойчивость функционирования динамических систем, в том числе живых организмов. Эти вопросы будут обсуждены в конце книги.

6.6. Растворы. Осмос

Осмос (от греч. ὄσμος – толчок, давление) – самопроизвольный переход вещества через полупроницаемую перегородку (мембрану), разделяющую два раствора разной концентрации или раствор и растворитель (рис. 6.25). При этом происходит выравнивание концентраций по обе стороны перегородки, т.е. устанавливается равновесие в системе. Механизм этого явления сложен. Существуют разные точки зрения. В литературе чаще упоминается диффузионный механизм процесса и его связывают с размерами молекул вещества и пор в мембране. Есть другая точка зрения, согласно которой процесс идет путем предварительного растворения молекул растворителя в мембране и последующей отдаче (переходу) молекул растворителя в раствор. Наиболее важный случай – переход молекул растворителя через полупроницаемую мембрану, не пропускающую молекулы растворенного вещества. Это будет приводить к понижению концентрации вещества в растворе. Т.е. если по разные стороны перегородки будут находиться растворы с разной концентрацией, то возникнет поток вещества в сторону раствора с меньшей концентрацией. Увеличение количества молекул растворителя повлечет за собой увеличения столба жидкости с одной стороны и, следовательно, увеличение гидростатического давления. В результате выравнивания концентраций процесс прекратится. Установившаяся при этом разность давлений по разные стороны перегородки называется осмотическим давлением.

Для сильно разбавленных растворов осмотическое давление определяется законом Вант – Гоффа:

$$\Pi = NkT/V = \mu RT/V, \quad (6.17)$$

где N и μ – числа молекул и молей вещества, соответственно, т.е. давление не зависит от природы растворённого вещества, а зависит только от его концентрации.

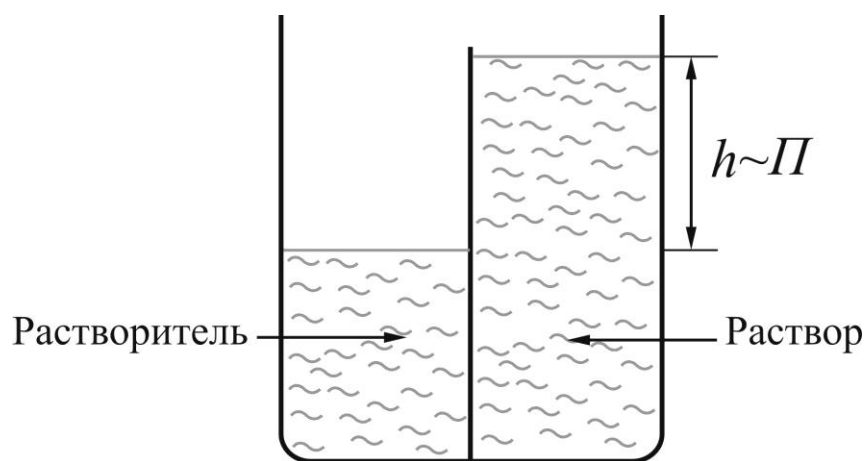


Рис. 6.25. Схематическое представление осмоса

Мембрана может быть проницаема не только для растворителя, но и для некоторых растворённых веществ. Это позволяет осуществить диализ. *Диализ* – это очистка коллоидных растворов и субстанций высокомолекулярных веществ от растворённых в них низкомолекулярных соединений при помощи полупроницаемой мембраны. При диализе молекулы растворенного низкомолекулярного вещества проходят через мембрану, а коллоидные частицы остаются за ней, поскольку не могут проходить через мембрану. Простейший диализатор представляет собой мешочек из коллодия (полупроницаемого материала), в котором находится диализируемая жидкость. Мешочек погружают в растворитель (например, в воду). Постепенно концентрация диализирующего вещества в диализируемой жидкости и в растворителе становится одинаковой. Меняя растворитель, можно добиться практически полной очистки от нежелательных примесей. Скорость диализа обычно крайне низка (исчисляется неделями). Ускоряют процесс диализа путем увеличения площадь мембраны и температуры, непрерывно меняя растворитель. Применительно к медицине – это *гемодиализ*, – процесс очищения крови с помощью полупроницаемой пористой мембраны в аппарате «искусственная почка».

Диализ применяют для очистки коллоидных растворов от примесей электролитов и низкомолекулярных неэлектролитов. В промышленности диализ применяют для очистки различных веществ, например, в производстве искусственных волокон, при изготовлении лекарственных веществ.

Отметим, что мембрана, окружающая нормальную клетку крови, проницаема лишь для молекул воды, кислорода, ряда ионов (калия, кальция, хлора), некоторых растворённых в крови питательных веществ и продуктов клеточной жизнедеятельности. Для больших белковых молекул, находящихся в растворённом состоянии внутри клетки, она непроницаема. Поэтому белки, столь важные для биологических процессов, остаются внутри клетки.

Осмоз играет огромную роль в обеспечении жизнедеятельности организмов разных уровней и растений. Рассмотрение этих вопросов можно найти в специальной литературе. Приведем лишь некоторые примеры. Использование кровезаменителей и физиологических растворов в клинике общеизвестно. Они, как правило, должны быть *изотоничны* по отношению к жидкостям организма (изотоническими, *изоосмотическими* называются растворы с одинаковыми значениями осмотического давления).

Осмоз участвует в переносе питательного вещества в стволах деревьев, где капиллярный перенос не способен выполнить эту функцию. Осмос лежит в основе плазмолиза клеток. *Плазмолиз* – искусственно вызываемое отставание (отделение) цитоплазмы от оболочки клетки (*деплазмолиз* – исчезновение плазмолиза). В качестве плазмолитиков – веществ, растворы которых вызывают плазмолиз, используют неядовитые вещества, слабо проникающие через цитоплазму в вакуоль. Плазмолиз можно вызвать, погружая клетку в раствор соли или сахара, концентрация которого выше концентрации клеточного сока (гипертонический раствор). Если бы цитоплазматическая мембрана была проницаемой, то происходило бы выравнивание концентраций клеточного сока и гипертонического раствора путем перемещения воды и растворенных веществ из клетки в раствор и обратно. Однако она, обладая свойством полупроницаемости, не пропускает внутрь растворенные в воде вещества. Напротив, только вода будет высасываться гипертоническим раствором из клетки, т.е. перемещаться через полупроницаемую цитоплазматическую мембрану. Объем вакуоли уменьшится. Цитоплазматическая мембрана в силу эластичности следует за сокращающейся вакуолью и отстает от оболочки клетки сначала в уголках, затем во многих местах с образованием вогнутых поверхностей (вогнутый плазмолиз), и, наконец, протопласт принимает

округлую форму (выпуклый плазмолиз). При погружении плазмолизированной клетки в воду или гипотонический раствор наблюдается де-плазмолиз.

Человек с древних времен, использовал эффект *осмоса* в процессе засаливания пищи, в ходе которого и происходил плазмолиз клеток патогена^{*}.

Для увеличения объёма вакуоли (чтобы она распирала стенки клетки – тургорное давление) клетки растений запасают сахарозу. Увеличивая или уменьшая концентрацию сахарозы в цитоплазме, клетки могут управлять осмосом. За счёт этого повышается упругость растения в целом. С изменениями тургорного давления связаны многие движения растений (например, движения усов гороха и других «лазающих растений»). Пресноводные простейшие также имеют вакуоль, но задача вакуолей простейших заключается лишь в откачивании лишней воды из цитоплазмы для поддержания постоянной концентрации растворённых в ней веществ.

Осмоз широко используют в лабораторной технике: при определении молярных характеристик полимеров, концентрировании растворов, исследовании разнообразных биологических структур. Физика явления достаточно полно описана в [16а]. Разнообразные проявления и приложения можно найти в интернете по ключевым словам «осмотическое давление», например в [16б], и словам, выделенным в тексте курсивом.

^{*} Патоген – термин, используемый для обозначения инфекционного агента (патогенных бактерий, вирусов, грибов, простейших, гельминтов), который обладает способностью вызывать инфекционный процесс у животных, растений и микроорганизмов. Синоним более широко принятого термина «возбудитель». В последнее время термин патоген распространяют на неинфекционные этиологические факторы. Патогенез – комплекс взаимосвязанных стадийных повреждающих, защитно-приспособительных и репаративных (восстановительных) реакций, выражающихся в более или менее глубоком повреждении и восстановлении структур и функций тех или иных органов и систем, а также в изменении поведения организма в целом.

6.7. Вопросы фармакокинетики

Введенное лекарство переходит из места введения (например, из желудочно-кишечного тракта, мышцы) в кровь, которая разносит его по организму и доставляет в различные ткани органов и систем. Этот процесс обозначают термином *абсорбция** – всасывание. Скорость и полнота абсорбции характеризуют *биодоступность* лекарства, определяют время наступления действия и его силу. Естественно, что при внутривенном и внутриартериальном введении лекарственное вещество попадает в кровоток сразу и полностью, и его биодоступность составляет 100 %.

При всасывании лекарство должно пройти через клеточные мембраны кожи, слизистых оболочек, стенок капилляров, клеточных и субклеточных структур. Все механизмы всасывания можно разделить на четыре основных вида (физической природы): *диффузия*, *фильтрация* (прохождение молекул через поры под действием давления), *активный транспорт* (перенос с затратами энергии), *осмос* и *пиноцитоз***.

* Означает поглощение вещества всем объемом поглощающего вещества; есть понятие *адсорбция* – поверхностное поглощение.

** Пиноцитóз (от др.-греч. πίνω – пью, впитываю и κύτος –местилище, здесь – клетка) – 1) Захват клеточной поверхностью жидкости с содержащимися в ней веществами. 2) Процесс поглощения и внутриклеточного разрушения макромолекул.

Один из основных механизмов проникновения в клетку высокомолекулярных соединений, в частности белков и углеводно-белковых комплексов.

Явление пиноцитоза открыто американским учёным У. Льюисом в 1931 году.

При пиноцитозе на плазматической мембране клетки появляются короткие тонкие выросты, окружающие капельку жидкости. Этот участок плазматической мембраны выпячивается, а затем отшнуровывается внутрь клетки в виде пузырька. Методами фазово-контрастной микроскопии и микрокиносъёмки прослежено формирование пиноцитозных пузырьков диаметром до 2 мкм. В электронном микроскопе различают пузырьки диаметром 0,07 – 0,1 мкм (*микропиноцитоз*). Пиноцитозные пузырьки способны перемещаться внутри клетки, сливаться друг с другом и с внутриклеточными мембранными структурами. Наиболее активный пиноцитоз наблюдается у амёб, в эпителиальных клетках кишечника и почечных канальцев, в эндотелии сосудов и растущих ооцитах. Пиноцитозная активность зависит от физиологического состояния клетки и состава окружающей среды. Активные индукторы пиноцитоза – γ -глобулин, желатин, некоторые соли.

Эти же механизмы транспорта через мембраны участвуют в распределении лекарств в организме и при их выведении. Некоторые лекарства, принимаемые orally, всасываются путем простой диффузии в желудке, большинство же из них – в тонком кишечнике, имеющем значительную поверхность (примерно 200 м^2 , если «расправить» все ворсинки эпителия^{*}) и интенсивное кровоснабжение. Желудок – первая остановка на пути принятых через рот лекарств. Здесь лекарства могут разрушаться при взаимодействии с пищей или пищеварительными соками, в частности, с соляной кислотой^{**}. Чтобы избежать этого, их помещают в специальные кислотоустойчивые оболочки, растворяющиеся лишь в щелочной среде тонкого кишечника. Разрушение лекарства под действием желудочного сока не единственная причина, по которой нежелательно разжевывать или толочь таблетку. Существуют препараты, из которых действующее вещество высвобождается не одновременно, а постепенно (медленно, длительно или рассчитано по времени – «порционно»). Если нарушить целостность системы доставки (оболочки капсулы или таблетки) этих средств, действующее вещество высвобождается сразу. При этом в организме пациента может образоваться концентрация препарата, значительно превышающая лечебную дозу или даже токсическую.

В желудке происходит всасывание лекарств, обладающих кислотными свойствами: салициловая кислота, ацетилсалициловая кислота, снотворные средства из группы производных барбитуровой ки-

^{*} Эпителий (лат. *epithelium*, от греч. ἐπι- – сверх- и θηλή – сосок молочной железы), или эпителиальная ткань – слой клеток, выстилающий поверхность (эпидермис) и полости тела, а также слизистые оболочки внутренних органов, пищевого тракта, дыхательной системы, мочеполовые пути. Кроме того, образует большинство желёз организма. Клетки эпителия лежат на тонкой базальной мембране, они лишены кровеносных сосудов, их питание осуществляется за счёт подлежащей соединительной ткани.

^{**} Существуют так называемые пролекарства – химически модифицированные формы лекарственного средства (эфир, соль, соль эфира и т.д.), которые в биологических средах в результате метаболических процессов превращаются в собственно лекарственное средство.

слоты (барбитураты), оказывающие успокаивающее, снотворное или противосудорожное действие, и других.

Также за счет диффузии всасываются лекарственные вещества и из прямой кишки при ректальном введении.

Фильтрация через поры мембран встречается значительно реже, так как диаметр этих пор невелик и через них могут пройти только мелкие молекулы. Наиболее проницаемы для лекарственных веществ стенки капилляров, а меньше всего – кожа, верхний слой которой состоит, в основном, из ороговевших клеток.

Но интенсивность всасывания через кожу может быть увеличена. Известно, что питательные кремы и маски наносят на специально подготовленную кожу (удаление избытка ороговевших клеток, очищение пор, улучшение кровоснабжения достигается, например, с помощью водяной бани), а усиления обезболивающего эффекта при воспалении мышц (миозите) добиваются с помощью местного массажа, втирая мази и растворы в больное место.

Всасывание лекарства при сублингвальном применении (под язык) происходит быстрее и интенсивнее, чем из желудочно-кишечного тракта. Врачи советуют в ситуациях, когда требуется быстрое оказание помощи (например, необходимо снять боль во время почечной или печеночной колики), растолочь таблетку Но-шпы (дротаверина) и держать ее во рту, не проглатывая, вместе с глотком горячей воды. Горячая вода вызывает расширение сосудов полости рта, и спазмолитический эффект препарата в этом случае наступает очень быстро, практически как после внутримышечной инъекции*.

Конечно, было бы очень удобно, если все лекарства можно было принимать внутрь. Однако пока этого добиться не удастся. Некоторые вещества (например, инсулин) полностью разрушаются ферментами в желудочно-кишечном тракте, а другие (бензилпенициллины) – наличием соляной кислоты в желудке. Такие лекарства применяют

* Внимание: при болях в животе прием любых обезболивающих или спазмолитических средств категорически запрещен до установления диагноза!

в виде инъекций. Этим же способом пользуются, если необходимо оказать экстренную помощь.

Если лекарство должно оказать действие только на месте введения, его назначают наружно, в виде мази, примочек, полоскания и тому подобное. Некоторые препараты, принимаемые в малых дозах (например, нитроглицерин), могут всасываться и через кожу, если их применяют в виде специальных лекарственных форм, например, трансдермальных («чрескожных») терапевтических систем.

Для газообразных и летучих лекарств основным способом является введение в организм с вдыхаемым воздухом (ингаляция). При таком введении всасывание происходит в легких, имеющих обширную поверхность и обильное кровоснабжение. Таким же путем происходит всасывание аэрозолей [17а, б].

Вместо заключения

Решение любой физической задачи основано на модельном принципе. На первом этапе выбирается модель, с помощью которой можно дать количественное описание системы или процесса. На втором этапе необходимо подобрать способы решения в рамках этой модели, адекватные сформулированной задаче. При рассмотрении механических явлений это, как правило, делается относительно просто. Например, падение тела (груза) без парашюта и с парашютом. В первом случае это свободное падение в модельном представлении, выполняется закон сохранения механической энергии. Силой трения при движении тела пренебрегают. Но трение, в действительности, есть. В результате, например, падающий космический корабль сгорает в плотных слоях атмосферы в полном соответствии с законом сохранения полной энергии. Падение с парашютом. Модель очевидна: движение тела под действием силы тяжести и силы сопротивления воздуха, которое в первом приближении можно принять постоянным. И можно рассчитать ее значение, при котором тело в конечной фазе полета будет падать с постоянной скоростью, при которой разрушения тела (при соприкосновении с землёй) не произойдет. Или расчет движения космических аппаратов, при котором необходимо включать гравитационные поля, создаваемые другими небесными телами по мере перемещения в пространстве. Это означает, что границы изолированной системы и свойства системы отсчета, в которой мы применяем законы Ньютона, будут изменяться. В термодинамике все гораздо сложнее. Поэтому рассмотрим классификацию систем (моделей) на примере решения конкретных задач.

Изолированные системы: не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом. Изучение таких систем привело к созданию классической термодинамики. Основные положения ее были рассмотрены в разделе 5.

Адиабатически изолированные системы: нет обмена с внешней средой веществом, но возможен обмен энергией посредством работы. Такая система используется для получения низких температур на основе эффекта Джоуля – Томсона. Принцип работы системы таков. В теплоизолированную трубку помещается пористая перегородка и сквозь нее прокачивается под большим давлением (дросселирует) газ, например азот. Воздушный напор (давление) создается насосом (при этом совершается работа). Газ, дросселируя через эту перегородку, выходит под более низким давлением, т.е. расширяется. Поскольку теплообмена нет, то вся работа идет на изменение внутренней энергии газа, что приводит к изменению кинетической энергии (температуры) как следствие изменения потенциальной энергии взаимодействия молекул при расширении газа (понижении давления). При определенных температурах этот перепад давления приводит к перепаду температуры в направлении ее уменьшения. Этот принцип работы адиабатически изолированной системы заложен в работе машины Линде, которая производит жидкие хладагенты – криожидкости, например, азот, кислород, гелий, водород. Другой способ получения низких температур (жидких хладагентов) основан на использовании эффекта Джоуля – Томсона при адиабатическом расширении газа (пример подобной машины – домашний холодильник). Здесь компрессор сжимает газ (фреон), который при этом нагревается и тепло через решетку радиатора отводится в окружающую атмосферу, потом газ адиабатически расширяется в специальной камере, охлаждаясь при этом, снова сжимается и т.д. В промышленных целях для получения жидких хладагентов используются машины, в которых используются одновременно оба способа понижения температуры (такой принцип был предложен Клодом в 1902 г.). Для получения более низких температур используется метод адиабатического размагничивания.

Закрытые системы – есть обмен с внешней средой энергией, но нет обмена веществом. Пример такой системы – запаянная колба (реторта), в которой проводили опыты по отжигу металла (т.е. в условиях

теплообмена) Ломоносов и Лавуазье – опыты, позволившие установить закон сохранения вещества (см. Приложение 6). Закрытые термодинамические системы стремятся перейти в состояние термодинамического равновесия, которое характеризуется прекращением в системе всех макроскопических процессов. Без внешних воздействий в таком состоянии система может оставаться сколь угодно долго.

Частично открытые системы – обмениваются с внешней средой и энергией, и веществом, но при этом не все компоненты вещества принимают участие в материальном обмене. Типичный пример такой системы – сосуд, разделенный полупроницаемой перегородкой, обуславливающей одностороннее прохождение молекул растворителя через такую перегородку из раствора, находящегося в одной части сосуда в другую половину сосуда – явление осмоса (Подраздел 6.6).

И наконец, *открытые системы*, в которых происходит обмен с внешней средой и энергией, и веществом. Это человек и животный мир. Гениальное озарение в ходе наблюдения за жизнедеятельностью человека в необычно жарких условиях привело Р. Майера к открытию основного закона природы – первого начала термодинамики (Приложение 6).

Область знаний, занимающаяся изучением механизмов преобразования энергии в процессах жизнедеятельности организмов, – термодинамика живых систем – именуется биоэнергетикой (биологической энергетикой). Это весьма сложная междисциплинарная область науки на стыке физики, химии и биологии, как по методам исследования (физико-химическим), так и по задачам и объектам исследования (биологическим). Таким образом, это часть и молекулярной биологии, и биофизики, и биохимии. Естественно, к ним примыкает медицина через биомедицину, поскольку конечная цель всех этих исследований – обеспечение эффективного функционирования живого организма. В контексте данного пособия мы рассмотрим только общие принципы функционирования живых систем.

В чем принципиальные различия классической термодинамики (физической термодинамики и химической – термодинамики систем с переменным числом ее компонентов) от термодинамики живых систем?

Ключевые понятия классической термодинамики – равновесные состояния и равновесные (квазиравновесные) процессы – не применимы для описания процессов в условиях постоянного обмена веществом и энергией с внешней средой. Необходимо использовать иные представления: стационарные состояния и стационарные (квазистационарные) процессы. Это означает, что второе начало термодинамики – закон возрастания (неубывания) энтропии, описывающий естественные процессы в природе (система, выведенная из положения равновесия, стремится к равновесному состоянию), должно быть переформулировано.

Стационарный режим работы живого организма означает, что должны поддерживаться постоянные потоки энергии и вещества в различной форме. В классической термодинамике такой перенос энергии и вещества называют явлениями переноса (Подразделы 6.5, 6.6).

Функцией живого организма является создание и поддержание градиента нескольких параметров: концентрации вещества (концентрационный градиент), градиент электрохимического потенциала (электрохимический градиент) и градиента автоматии в проводящей системе сердца.

Градиент концентрации, обуславливающий диффузию в газах и жидкостях, уже был рассмотрен (Подраздел 6.5).

Электрохимический градиент или градиент электрохимического потенциала – это совокупность градиента концентрации и мембранного потенциала, которая определяет направление движения ионов через мембрану. Состоит из двух составляющих: градиента концентрации, обусловленного разницей концентраций растворённого вещества по обе стороны мембраны, и электрического градиента, обусловленного разницей по величине зарядов, расположенных на противоположных

сторонах мембраны. Таким образом, электрохимический градиент возникает вследствие разной концентрации ионов на противоположных сторонах водопроницаемой мембраны. Ионы перемещаются через мембрану из области с более высокой концентрацией в область с более низкой концентрацией путём диффузии. Ионы несут с собой и электрический заряд, который формирует электрический потенциал на мембране (мембранный потенциал). Если существует неравномерное распределение зарядов по обе стороны мембраны, то разница в электрическом потенциале порождает силу, которая приводит к ионной диффузии, пока заряды по обе стороны не будут сбалансированы. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующей части курса.

Градиент автоматии. Автоматия сердца – это способность клеток сердца к самовозбуждению без каких-либо воздействий извне. Изолированное сердце при снабжении его питательным раствором способно сокращаться вне организма продолжительное время. Потенциально все элементы проводящей системы (Раздел 2.3.3) в разной степени способны к генерации автоматического ритма. Водителем ритма сердца является синоатриальный узел. Взаимодействуя с экстракардиальными нервами, он определяет частоту сокращений сердца $60 \div 80$ в мин. В случае повреждения узла, функции водителя ритма выполняет атриовентрикулярный узел ($40 \div 50$ сокращений сердца в мин), далее – пучок Гиса ($30 \div 40$) и волокна Пуркинье (20). Убывание частоты генерации возбуждения проводящей системой сердца в направлении от предсердий к верхушке сердца называют *градиентом автоматии*.

Наглядным примером стационарного режима является работа любой транспортной системы, например, трубопровода. Применительно к человеку это введение в организм вещества и выведение из него продуктов метаболизма. В норме это стационарный процесс с постоянными градиентами концентрации. Таким образом, естественной реакцией организма является восстановление нарушенного каким-либо образом стационарного состояния открытой системы.



И.Р. Пригожин
(1917–2003 гг.)

Физической основой такой регуляции является теорема Пригожина*, являющаяся формулировкой второго начала термодинамики применительно к открытым системам. Согласно теореме Пригожина: «стационарному состоянию системы (в условиях, препятствующих достижению равновесного состояния) соответствует минимальное производство энтропии» – минимальный прирост энтропии в физической системе за единицу времени в результате протекающих в ней неравновесных процессов.

Второе принципиальное отличие заключается в том, что процессы в клетках протекают в условиях отсутствия перепадов температуры, давления и объёма. По этой причине прямой переход теплоты в работу в организме невозможен и тепловыделение представляет собой невозвратную потерю энергии. Поэтому в ходе эволюции организмы выработали ряд специфических механизмов прямого преобразования одной формы энергии в другую, минуя её переход в тепло. В организме лишь небольшая часть освобождающейся энергии превращается в тепло и теряется. Большая её часть преобразуется в форму свободной химической энергии определённых соединений, в которых она чрезвычайно мобильна, т.е. может и при постоянной температуре превращаться в иные формы, в частности совершать работу.

Теперь становится понятной ответная приспособительная реакция организма на самые различные внешние воздействия, как правило, приводящая на начальном этапе к ухудшению общего состояния организма и далеко не всегда проходящая бесследно. Добавим к ним реак-

* Илья Романович Пригожин (*Ilya Prigogine*) – бельгийский физик и физикохимик российского происхождения. Один из двух лауреатов Нобелевской премии по химии (1977) российского происхождения (первый – Николай Николаевич Семёнов), виконт Бельгии. Основные его работы посвящены неравновесной термодинамике и статистической механике необратимых процессов.

ции организма на резкие изменения температуры окружающей среды (считается, что перепад температур на 10 градусов и более может приводить к нарушению работы иммунной системы человека), пересечение временных поясов, резкое нарушения режима питания, передозировка лекарственных препаратов и многое другое.

Основным и практически единственным источником энергии для жизни на Земле является энергия излучения Солнца*, часть которой поглощается пигментами растений и некоторых бактерий и в процессе фотосинтеза** аккумулируется автотрофными*** организмами в форме химической энергии: частью в виде АТФ – аденозинтрифосфата (за счет процессов фотосинтетического фосфорилирования), частью в виде энергии некоторых специфических соединений (восстановленных никотинамид-адениндинуклеотидов), являющихся важнейшими промежуточными аккумуляторами энергии. Весь дальнейший процесс синтеза углеводов, а затем и липидов, белков и других компонентов клетки осуществляется в цикле темновых ферментативных реакций (комплекс ферментативных реакций, во время которых происходит восстановление поглощенного углекислого газа за счет продуктов, образовавшихся во время световой фазы) за счёт энергии указанных выше соединений.

Детальное рассмотрение этих вопросов выходит за пределы данного пособия. Они рассматриваются в курсе «Биоэнергетика». Различ-

* Вторым источником энергии является Мировой океан, подогреваемый теплотой, выделяемой в результате процессов, происходящих внутри Земли.

** Фотосинтез (от др.-греч. φῶς – свет и σύνθεσις – соединение, складывание, связывание, синтез) – процесс преобразования энергии света в энергию химических связей органических веществ на свету фотоавтотрофами при участии фотосинтетических пигментов (хлорофилл у растений, бактериохлорофилл и бактериородопсин у бактерий). В современной физиологии растений под фотосинтезом чаще понимается фотоавтотрофная функция – совокупность процессов поглощения, превращения и использования энергии квантов света в различных эндэргонических реакциях (где работа совершается над системой), в том числе превращения углекислого газа в органические вещества.

*** Автотрофы (др.-греч. αὐτός – сам + τροφή – пища) – организмы, синтезирующие органические вещества из неорганических.

ные варианты этого курса лекций можно найти в поисковых системах по одноименному названию (например, курс лекций в МГУ В.П. Скулачева http://bioenergetics.pro/lectures/be_course/). Общие представления можно получить из соответствующих разделов энциклопедических изданий. Например, БСЭ [19].

Жизнедеятельность человека в условиях высокогорья [9б]

В горах организм человека вынужден приспосабливаться к характерным только для пребывания в них условиям: нехватке кислорода и влаги в воздухе, резким перепадам температуры, сильной ультрафиолетовой радиации, чрезвычайной яркости дневного света.

Из-за недостатка кислорода снижается слюноотделение, ослабевает деятельность всех пищеварительных желез, желчеобразование, выделение сока поджелудочной железой, нарушается всасывание жиров, ухудшается перистальтика кишок. Нередки случаи желудочно-кишечных расстройств, которые могут быть вызваны другими факторами, например, раздражением слизистой оболочки желудка мельчайшими частичками слюды, которая содержится в воде многих горных ручьев*.

Пища на больших высотах почти всегда не доварена, так как температура кипения воды здесь понижается примерно на 5 °С при подъеме на каждые 1500 м. В таблице 1 приведены температуры кипения воды в зависимости от высоты местности.

Технология приготовления пищи в горных условиях известна. Но этот вопрос выходит за пределы данного курса.

* Из-за пластинчатости структуры кристаллов слюды и способности их легко расщепляться на чрезвычайно тонкие листочки содержащаяся в горных породах слюда легко вымывается быстрым потоком воды. Плотность слюды невелика, в пределах $2,7 \div 3,3 \text{ г/см}^3$. Поэтому частички слюды не оседают полностью как более тяжелые компоненты горных пород, например золота.

Температура кипения воды на различных высотах

Высота над уровнем моря, м	Температура кипения воды, °С	Высота над уровнем моря, м	Температура кипения воды, °С
0	100,0	3000	90,0
500	98,3	3500	88,3
1000	96,7	4000	86,7
1500	95,0	4500	85,0
2000	93,3	5000	83,3
2500	91,7	6000	80,0

На высоте уменьшается всасывание воды и питательных веществ. Все это приводит к нарушению процессов пищеварения и усвоения пищи, ослаблению организма. На высоте человек может ощущать ложное чувство полноты желудка, распирающие в подложечной области, тошноту, страдает поносами, не поддающимися медикаментозному лечению. В крови его становится меньше заменимых и незаменимых аминокислот, изменяется кислотно-щелочное равновесие, часты случаи мелких кровоизлияний на внутренней поверхности губ, появляются зубные боли. Недостаток кислорода препятствует нормальному окислению углеводов в тканях и вызывает значительное накопление в организме недоокисленных продуктов обмена, в частности молочной кислоты. Такое накопление нарушает работу ряда ферментов, приводит к нарушению и угнетению процесса обмена веществ. Поэтому объем работы (работоспособность) организма резко снижается. Так (по Е.Б. Гиппенрейтеру) на высоте 3 000 м работоспособность составляет 90 %, 4000 м – 80 %, 5000 м – 50 %, 6200 м – 30 % и 8000 м – 15–16 % максимальной ее величины, измеренной на уровне моря. Даже по окончании работы, несмотря на прекращение мышечной деятельности, организм продолжает находиться в напряжении, потребляя некоторое время повышенное количество кислорода для того, чтобы ликвидировать

кислородную задолженность. Следует отметить, что время, необходимое для этого, зависит не только от интенсивности и продолжительности мышечной работы, но и от степени тренированности человека. Наличие недоокисленных продуктов приводит к некоторому обезвоживанию организма и мышечным болям. Известно, что в результате окисления продуктов питания выделяется определенное количество воды (например, при окислении 100 г жиров выделяется 107 мл воды), но при неполном завершении такой реакции количество выделяемой воды, естественно, сокращается. Известно также, что в обычных условиях организм человека в среднем выделяет в сутки около 3 л воды. Через кожу – $0,5 \div 0,8$ л, через легкие – около 0,4 л. При усиленной мышечной деятельности в условиях жары и интенсивной солнечной радиации на высоте, резко возрастает выделение воды через кожу (до $6 \div 8$ и более литров). В то же время напряженная мышечная работа, совершаемая в условиях высокогорья, в связи с недостатком кислорода и сухостью воздуха резко увеличивает глубину и частоту дыхания, то есть увеличивает так называемую легочную вентиляцию, в результате чего возрастает выделение воды и через легкие (до $3 \div 4$ л). Этому способствует и невысокая влажность в горах. Все это приводит к тому, что общие потери воды могут достигнуть $10 \div 12$ л/сут.

Обезвоживание организма сказывается на самочувствии, настроении и, следовательно, на работоспособности человека. Количество потребляемой жидкости в период нахождения в высокогорье, и особенно при совершении интенсивной работы, должно составлять 4 и более литров в сутки. Это самая эффективная мера борьбы с обезвоживанием организма. Кроме того, большое количество воды способствует и большему выведению из организма через почки недоокисленных продуктов обмена. При обильном потоотделении теряются не только жидкость, но и минеральные вещества. Талая вода, получаемая из снега и льда, которой в основном пользуются в горах, почти лишена солей. Поэтому желательно искусственно минерализовать рацион питания. Организм человека, совершающего длительную интенсивную работу в условиях

высокогорья, требует повышенного (в 2–3 раза) количества витаминов, особенно тех, которые входят в состав ферментов, участвующих в регуляции окислительно-восстановительных процессов и тесно связанных с обменом веществ в организме. Это витамины группы В, наиболее важные из которых – В12 и В15, а также В1, В2 и В6. Так, витамин В12 способствует повышению работоспособности организма на высоте, существенно облегчая выполнение больших и интенсивных нагрузок и повышая энергетический ресурс организма. Он повышает эффективность кислородного обмена в клетках тканей, способствует уменьшению кислородного долга, повышает высотную устойчивость, усиливает механизмы активной адаптации к недостатку кислорода, а также окисление жиров на высоте. Важную роль играют также витамины С, РР и Вс (фолиевая кислота) в сочетании с глицерофосфатом железа и метилурацилом. Такой комплекс оказывает влияние на увеличение количества эритроцитов и гемоглобина, т.е. на увеличение кислородной емкости крови. В рационы высотных путешественников следует непременно включать кислые продукты: они не только «смягчают» горную болезнь, но и повышают у них высотный «потолок». На ускорение адаптации оказывают влияние и так называемые адаптогены – средства, повышающие работоспособность организма: женьшень, элеутерококк и акклиматизин (смесь элеутерококка, лимонника и желтого сахара). Рекомендуются также комплексы препаратов, повышающих приспособляемость организма к гипоксии – недостатку кислорода на высоте – и облегчающих течение горной болезни. Первая смесь: элеутерококк, дибазол, витамины А, В1, В2, В6, В12, С и РР, пантотенат кальция и хлористый кальций. Вторая смесь: 0,05 г аскорбиновой кислоты, 0,5 г лимонной кислоты и 50 г глюкозы. Третья смесь: лимонная и глютаминовая кислоты, глюкоза, хлористый и фосфорнокислый натрий (сухой черносмородиновый напиток в брикетах по 20 г). Это рекомендации общего характера. Более детально эти вопросы рассмотрены в специальной литературе [96].

Витальные зоны организмов [11, 12]

По отношению к температурным условиям микроорганизмы разделяют на *мезофильные, психрофильные и термофильные* (см. рис. 1). Деление бактерий на указанные группы довольно условно, так как температурные диапазоны их роста значительно перекрываются.

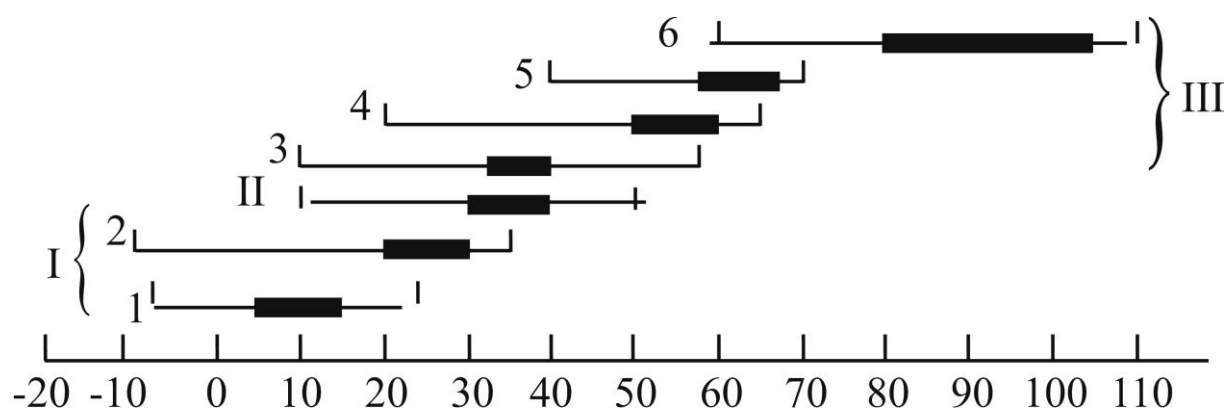


Рис. 1. Витальные зоны микроорганизмов. Температурные границы (в шкале Цельсия) и оптимальные зоны роста прокариот и основанная на этом классификация. I. Психрофилы: 1 – облигатные; 2 – факультативные. II. Мезофилы. III. Термофилы: 3 – термотолерантные; 4 – факультативные; 5 – облигатные; 6 – экстремальные. Жирной чертой выделены оптимальные температуры роста

Большинство известных видов относится к мезофилам, у которых оптимальные температуры роста лежат в интервале 3÷40 °С, а температурный диапазон, в котором возможен их рост, находится в интервале 10÷50 °С. Типичным мезофилом является *E. coli*: нижняя граница роста +10 °С, верхняя +49 °С, оптимальная температура +37 °С при росте на богатой среде.

Область температур роста психрофилов лежит в пределах от -10 до $+20$ °C и выше. В свою очередь, психрофилы делятся на облигатные и факультативные.

Основное различие между подгруппами заключается в том, что облигатные психрофилы не способны к росту при температуре выше 20 °C, а верхняя температурная граница роста факультативных форм намного выше. Различаются они также и оптимальными температурными зонами роста, находящимися у облигатных психрофилов значительно ниже, чем у факультативных. Принципиальное же сходство между ними – способность к росту при 0 °C и отрицательных температурах. Группу термофилов делят на 4 подгруппы:

1. *Термотолерантные* виды растут в пределах от 10 до $55\div 60$ °C; оптимальная область находится в интервале $35\div 40$ °C.
2. *Факультативные термофилы* имеют максимальную температуру роста между 50 и 65 °C, но способны также к размножению при комнатной температуре (20 °C). К *облигатным* термофилам относят виды, обнаруживающие способность расти при температурах около 70 ° и не растущие ниже 40 °C.
3. *Прокариоты*, выделенные в подгруппу *экстремальных термофилов*. Для них характерны следующие температурные параметры: оптимум в области $80\div 105$ °C, минимальная граница роста 60 °C и выше, максимальная – до 110 °C.
4. Бактерии, способные расти при температуре воды $250\div 300$ °C и давлении 265 атм. (при этом давлении вода в жидком состоянии может находиться до 460 °C). Эти бактерии выделены из проб воды, поднятых с глубины 2560 м Тихого океана, где, предположительно, они существуют в горячих струях, выбрасываемых на дне океана так называемыми «черными гейзерами». Давление в районе обнаружения бактерий около 250 атм., а температура воды может быть выше 350 °C*.

* Особое состояние воды, см. в [11].

В связи с этим исследователи начинают переоценивать границы условий, при которых способны развиваться прокариоты. Высказывается предположение, что прокариоты могут существовать везде, где есть вода в жидком состоянии и достаточное количество питательных веществ.

Высокая температура вызывает коагуляцию структурных белков и ферментов микроорганизмов. Большинство вегетативных форм гибнет при 60 °С в течение 30 мин, а при 80÷100 °С – через 1 мин. Для сохранения жизнеспособности относительно благоприятны низкие температуры (например, ниже 0 °С), безвредные для большинства микробов. Бактерии выживают при температуре ниже – 100 °С; споры бактерий и вирусы годами сохраняются в жидком азоте. Простейшие и некоторые бактерии (спирохеты, риккетсии и хламидии) менее устойчивы к температурным воздействиям.

Воздействие высоких температур широко используется в лабораторной микробиологической практике. Стерилизация (*sterilis* – бесплодный) объектов проводится методами автоклавирования, кипячения, тиндализации, пастеризации, фламбирования, обработки сухим жаром, паром без давления. В хирургической практике стерилизуют инструменты, растворы, перевязочный материал.

Холодоустойчивость микроорганизмов

Организмы, способные образовывать тепло внутри своего тела с помощью различных физиологических и биохимических механизмов, называют *эндотермными (эндотермы)*, а организмы, температура тела которых полностью зависит от температуры окружающей среды, т.е. определяется внешними источниками тепла – *эктотермными (экто-термы)*.

Многочисленные наблюдения позволяют утверждать, что при переходе от среды обитания с относительно высокой температурой к среде обитания с низкой температурой эктотермные организмы способны поддерживать свой метаболизм на необходимом для нормальной жизнедеятельности уровне, для чего в процессе эволюции у них сформирова-

ровались специальные генетико-биохимические механизмы. Поддержание постоянства метаболизма у эктотермных организмов при смене температуры обитания названо *температурной компенсацией*. Генетико-биохимическая адаптация эктотермных организмов к изменению температурных условий обитания достигается разными путями: регуляцией экспрессии генов, изменениями функциональной активности ферментов, заменой одних изоферментов другими, изменениями концентрации ферментов в клетках и тканях и подвижностью жидкокристаллического состояния мембран.

Патогенные бактерии при выведении из теплокровного организма попадают в окружающую среду, где температура значительно ниже, и перепад ее для бактерий может составлять до $30\div 35\text{ }^{\circ}\text{C}$. С учетом столь узкого диапазона активности ферментов становится понятным, что в этих изменяющихся условиях ни один фермент не способен функционировать. Эктотермные организмы могут синтезировать несколько форм ферментов, сходных по функции, но отличающихся молекулярной массой и приспособленностью к различным температурам. Синтез этих форм кодируется разными генными локусами и называются они *изоферментами (изозимами)*.

Считалось, что патогенные микроорганизмы, будучи паразитами теплокровных животных и человека, температурный оптимум которых лежит в пределах $36\div 39\text{ }^{\circ}\text{C}$, не могут размножаться при низких температурах и в связи с этим не способны обитать в окружающей среде. Почти все патогенные бактерии относятся к *мезофилам*. Однако большое количество видов бактерий, способных вызывать болезни животных, имеют широкий температурный диапазон роста (от 0 до $45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Например, возбудитель холеры размножается при $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, возбудитель туберкулеза – при $20\div 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обнаружение патогенных бактерий (сальмонелл, шигелл, иерсиний, стафилококков, псевдомонад, клостридий, бацилл, листерий, клебсиелл, эшерихий, микобактерий) в почве, воде, иле, животных и растительных остатках позволяют проследить определенную закономер-

ность: при понижении температуры ниже 20 °С и при наличии достаточной влажности жизнеспособность перечисленных бактерий увеличивается многократно. Не образующие спор бактерии не способны длительно сохраняться при низкой температуре в окружающей среде без активного роста.

Таким образом, нет сомнений в том, что большое количество видов патогенных бактерий могут размножаться при биологически низкой температуре. Однако оптимум роста таких микроорганизмов, т.е. когда скорость размножения клеток наибольшая, сдвинут все же в сторону более высоких температур (22÷30 °С).

Роль низких температур в популяционной изменчивости бактерий двойная. С одной стороны, она, наряду с питательным субстратом, является направляющим и стабилизирующим фактором отбора и может при определенных условиях способствовать формированию вирулентных клонов в окружающей среде. С другой стороны, при переходе бактерии из внешней среды с низкой температурой в макроорганизм и наоборот, т.е. когда происходит резкая смена температуры и среды обитания (сапрофитическая и паразитическая), создается стрессовая ситуация, усиливающая гетерогенность популяции, вследствие чего увеличивается потенциальная возможность освоения новой экологической ниши.

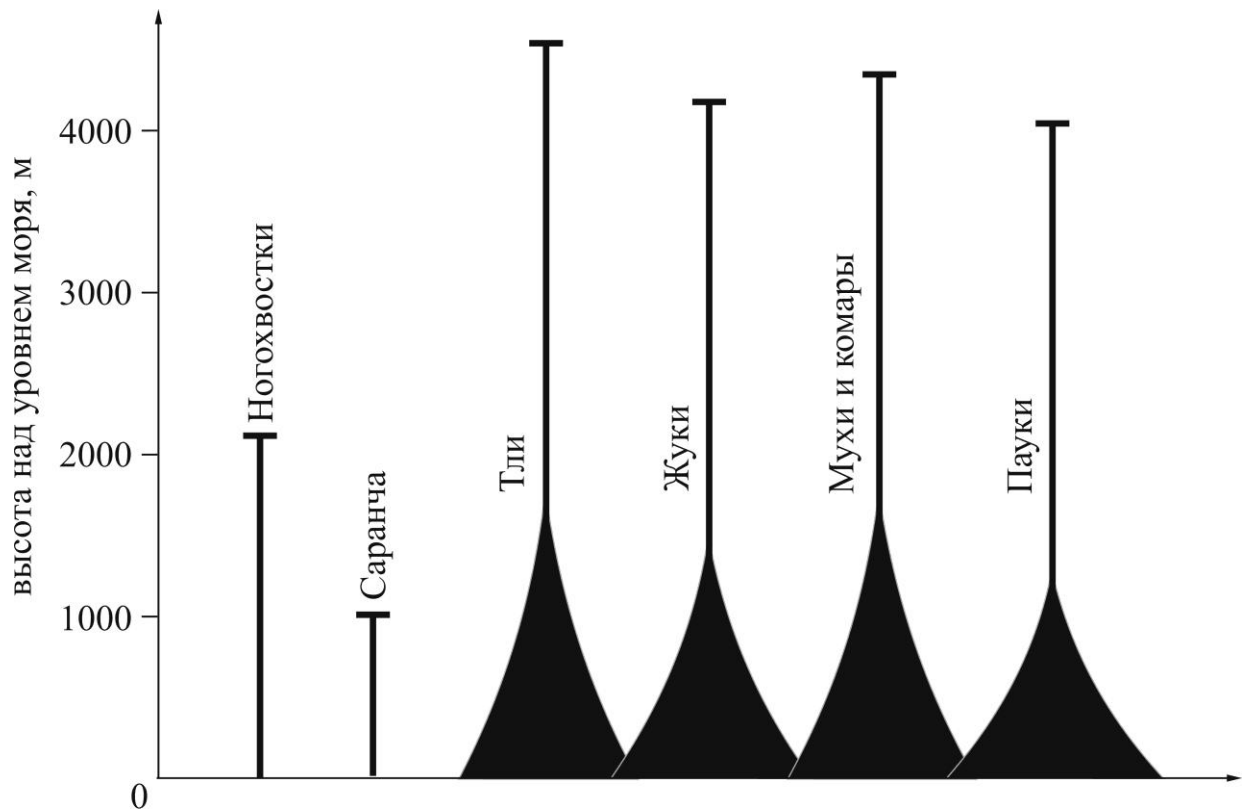
Для факультативных паразитов, способных обитать не только в организме теплокровных, но и в окружающей среде, низкая температура столь же естественна, как и температура 37÷39 °С. Человек (животный мир) общается с рассмотренными микроорганизмами. Организм животных адаптируется к ним. Но человек, в силу разных причин, оказывается в непривычной для себя среде обитания. И либо является переносчиком этих микроорганизмов (промежуточным звеном) после прямого контакта с насекомым, либо они попадают к нему в организм с пищей, водой, воздухом [11, 12].

Проникновение животных на большие высоты [20]



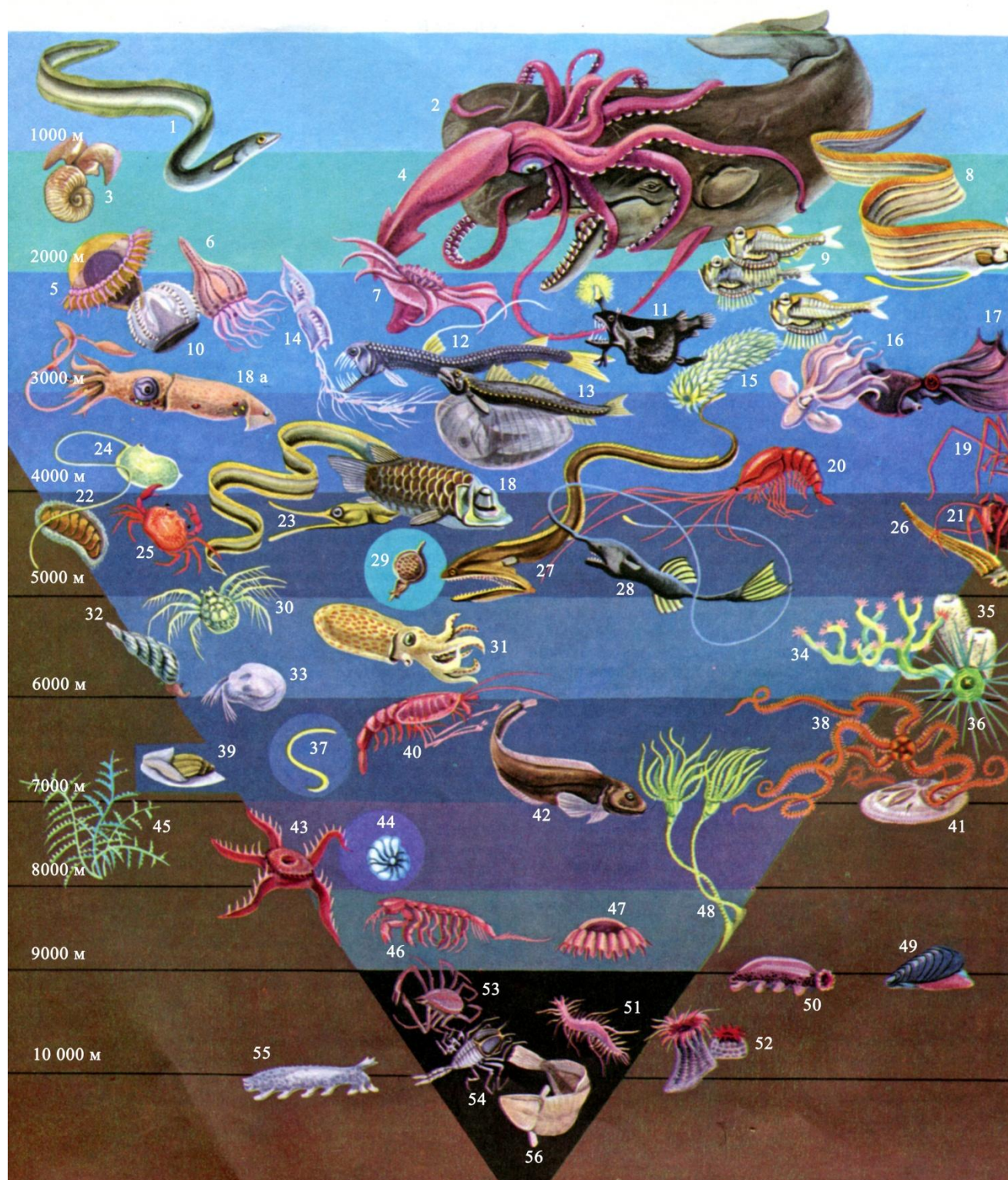
1 – гуси (почти 9500 м); 2 – галки (свыше 8000 м); 3 – кондор (7000 м); 4 – бабочки (6600 м); 5 – пчелы (6600 м); 6 – пищуха (6300 м); 7 – тибетский ворон (6000 м); 8 – беломордый олень (6000 м); 9 – снежный барс (6000 м); 10 – лангур (6000 м); 11 – викунья (5600 м); 12 – пума (5600 м); 13 – андский олень (5000 м); 14 – брюхоногий моллюск (5000 м); 15 – поселения человека (4800 м); 16 – фламинго (4500 м); 17 – горный тапир (4600 м); 18 – рыбы (4600 м); 19 – горная горилла (4200 м); 20 – летучая мышь (4100 м); 21 – гималайский медведь (4000 м); 22 – малая панда (4000 м); 23 – гуанако (почти 4000 м), 24 – колибри (почти 4000 м); 25 – двустворчатый моллюск (почти 4000 м); 26 – слон (3660 м). Выше 3000 м живут: 27 – заяц; 28 – горностай; 29 – волк; 30 – горный баран; 31 – стрижи (3000 м); 32 – чибисы (2500 м) и другие птицы во время пролета на высоте более 1000 м.

Проникновение насекомых на большие высоты



Сравнительные высоты, на которых находили летящих или занесенных восходящими потоками воздуха насекомых и пауков. Для тлей, мух и комаров максимальная высота свыше 4000 м, для саранчи – около 1000 м.

Вертикальное распространение обитателей морских глубин [20]



1 – угорь (мечет икру на глубине около 1000 м); 2 – кашалот (ныряет на глубину до 1500 м); 3 – крылоногий моллюск (обитает на глубине око-

ло 2000 м); 4 – гигантский кальмар (2000 м); 5,6 – глубоководные медузы (2000 м); 7 – пелагическая голотурия (2000 м); 8 – сельдяной король (2000 м); 9 – рыбы-топорики (2000 м); 10 – гребневик (2500 м); 11 – глубоководный удильщик линофрина (2600 м); 12 – хаулиод (2800 м); 13 – черный хиазмодон (3000 м); 14 – сифонофора (4000 м); 15 – пиросома (3000 м); 16, 17 – глубоководные осьминоги (3000 м); 18 – опистопрокт (4000 м); 18а – светящийся кальмар «чудесная лампа»; 19 – многоколенный «морской паук» пантопода (4000 м); 20 – креветка *Notostomus* криль (4000 м); 21 – рак-отшельник (4300 м); 22 – хитон, панцирный моллюск (4200 м); 23 – глубоководный угорь; 24 – глубоководная асцидия (4500 м); 25 – краб (4700 м); 26 – лопатоногий моллюск (4800 м); 27 – мешкорот (5000 м); 28 – глубоководный удильщик гигантактис (5000 м); 29 – лучевики (5000 м); 30 – морской клещ (5000 м); 31 – каракатица *Bolitaena rugmaea* (5400 м); 32 – брюхоногий моллюск; 33 – ракушковый рачок (почти 6000 м); 34 – кораллы (почти 6000 м); 35 – губки (6000 м); 36 – правильный морской еж (6000 м); 37 – нематода (6600 м); 38 – офиура (6800 м); 39 – голожаберник (6860 м); 40 – мизида (6500 м); 41 – неправильный морской еж (7200 м); 42 – карепрокт (7500 м); 43 – морская звезда (7600 м); 44 – фораминифера (7500 м); 45 – гидроид (8000 м); 46 – морской ослик (8200 м); 47 – медуза *Nausithoe* (8300 м); 48 – стебельчатая морская лилия (8300 м); 49 – двустворчатый моллюск (9000 м); 50 – абиссальная голотурия (9700 м); 51 – многощетинковый червь (9950 м); 52 – актиния (10 000 м); 53 – краб (более 10 000 м); 54 – бокоплав (10 000 м); 55 – ультраабиссальная голотурия (10 200 м); 56 – морской язык (более 10 000 м).

Эволюция основного закона природы – закона сохранения вещества и энергии



Г.В. фон Лейбниц
(1646–1716 гг.)



Ю.Р. фон Майер
(1814–1878 гг.)

Закон сохранения механической энергии был установлен Г. Лейбницем* в 1686 г. и лишь в 1842 г., более полутора столетий спустя, Р. Майером** был сформулирован основной закон природы – закон сохранения энергии, согласно которому «Энергия в изолированных системах не может увеличиваться или уменьшаться, а может переходить из одного вида в другой». И далее: «Движение, теплота и, как мы намерены показать в дальнейшем, электричество, представляют собой явления, которые могут быть сведены к единой силе, которые изменяются друг другом и переходят друг в друга по определенным законам. Всеобщий закон природы, не допускающий никаких исклю-

* Готфрид Вильгельм Лейбниц (*Gottfried Wilhelm von Leibniz*) – саксонский философ, логик, математик, механик, физик, юрист, историк, дипломат, изобретатель и языковед. Основатель и первый президент Берлинской Академии наук.

** Юлиус Роберт фон Майер (*Julius Robert von Mayer*) – немецкий врач и естествоиспытатель. Родился в семье немецкого аптекаря.

чений, гласит, что для образования тепла необходима известная затрата. Эту затрату, как бы разнообразна она ни была, всегда можно свести к двум главным категориям, а именно, она сводится либо к химическому материалу, либо к механической работе (с учетом астрономических явлений)». Статья не была принята в печать и работа Р.Майера стала известна только в 1848 г.

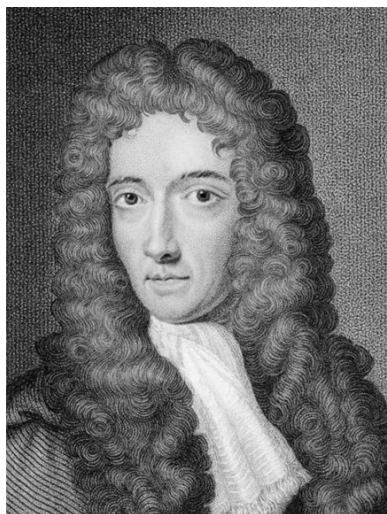


Г. фон Гельмгольц
(1821–1894 гг.)

В 1847 г Г. Гельмгольц* ввел понятие «внутренняя энергия» и дал следующую формулировку закона сохранения энергии: *«Во всех случаях, когда происходит движение подвижных материальных точек под действием сил притяжения и отталкивания, величина которых зависит только от расстояния между точками, уменьшение силы напряжения всегда равно увеличению живой силы, и наоборот, увеличение первой приводит к уменьшению второй. Таким образом, всегда сумма живой силы и силы напряжения постоянна»*. И далее: *«определение энергии, принятое в механике: энергия = кинетическая энергия + потенциальная энергия, следовало бы обобщить и записать в следующем виде: энергия = кинетическая энергия + потенциальная энергия + теплота + электрическая энергия + другие формы энергии, которые будут найдены или предложены... Когда мы без всяких дополнительных пояснений используем слово «энергия», мы подразумеваем так называемую «полную энергию», т.е. сумму всех ее различных форм»*. По Гельмгольцу: «Работа, совершенная над системой, должна равняться увеличению энергии системы. Однако эта дополнительная энергия может перейти как в механическую (кинетическую или потен-

* Герман фон Гельмгольц (*Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz*) – немецкий физик, врач, физиолог, психолог, акустик, родился 31 августа 1821 года в Потсдаме, близ Берлина, где его отец Фердинанд Гельмгольц служил учителем гимназии.

циальную) энергию, так и в тепло, электрическую энергию или в какую-нибудь другую неизвестную до этого форму».



Р. Бойль
(1627–1691 гг.)



М.В. Ломоносов
(1711–1765 гг.)



А.Л. Лавуазье
(1743–1794 гг.)

Этому открытию предшествовали опыты Р. Бойля*, М. Ломоносова** и А. Лавуазье***, проведенные в середине 18 века. Это были опыты по установлению закона сохранения массы вещества, который в современной формулировке представлен следующим образом: «Вес всех веществ, вступающих в реакцию, равен весу всех продуктов реакции». Этот закон был ими экспериментально подтверждён в 1756 г. на примере обжига металлов в запаянных сосудах.

* Роберт Бойль (*Robert Boyle*) – англо – ирландский натурфилософ, физик, химик и богослов, седьмой сын Ричарда Бойля, графа Коркского, вельможи времён Елизаветы Английской.

** Михаил Васильевич Ломоносов – первый русский учёный – естествоиспытатель мирового значения, энциклопедист, химик и физик; он вошёл в науку как первый химик, который дал физической химии определение, весьма близкое к современному, и предначертал обширную программу физико–химических исследований.

*** Антуан Лоран Лавуазье (*Antoine Laurent de Lavoisier*) – французский естествоиспытатель, заложивший основы современной химии, один из величайших учёных Франции.

В изложении на русском языке этот закон сформулирован М. Ломоносовым в работе «Рассуждение о твёрдости и жидкости тел» (1760 г.): *«Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте; сколько часов положит кто на бдение, столько же сну отнимет. Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оные у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает».*

Р. Бойль в своих опытах показал, что при обжиге металлов увеличивается их вес, и объяснял это увеличение веса соединением с металлами весомой части пламени, материи огня. Бойль брал стеклянные реторты, клал в них свинец или олово, запаивал герметически на огне горлышко реторты и взвешивал их. При нагревании такой реторты свинец превращался в окалину. Когда, после двухчасового нагревания, он открывал запаянный кончик реторты, воздух с шумом врывался в неё – доказательство того, как указывал Бойль, что реторта была действительно герметически запаяна – и при вторичном взвешивании обнаружилось увеличение веса. Отсюда Бойль заключил, что материя огня проходит через стекло и соединяется с металлом.

Эти опыты Ломоносов повторил в 1756-м году и, как он сам писал в ежегодных отчётах о своих занятиях, со следующим результатом: «Между разными химическими опытами, которых журнал на 13-ти листах, деланы опыты в заплавленных накрепко стеклянных сосудах, чтобы исследовать, прибывает ли вес металлов от чистого жара. Оными опытами нашлось, что славного Роберта Бойля мнение ложно, ибо без пропускания внешнего воздуха вес сожжённого металла остается в одной мере».

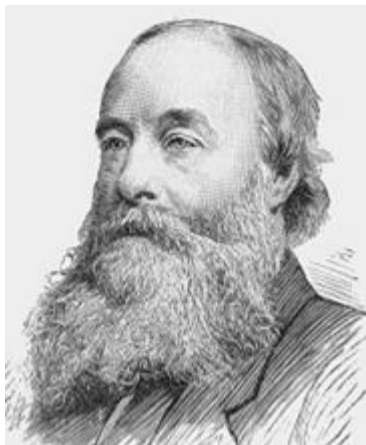
Последнее обстоятельство – пропускание внешнего воздуха и было причиной того, что у Бойля, вскрывавшего всегда свои реторты перед взвешиванием, наблюдалось увеличение веса.

Таким образом, опыты М.В. Ломоносова с полной определённо-стью показали, что образование окалина происходит именно от соединения металла с воздухом при обжиге. Результат этот чрезвычайно важен. Истинное объяснение процесса горения, как окисление горящего или обжигаемого тела, судя по известной нам истории науки, принадлежит А.–Л. Лавуазье. Он начал свои классические исследования именно с повторения опытов Бойля и в 1773 году, через 17 лет после Ломоносова, получил совершенно такой же результат, как и Ломоносов. Лавуазье затем изучил те изменения, которые происходят с воздухом при обжиге металлов, и дал верное объяснение явлений горения.

Любопытна история «Основного закона природы». В путешествии на шхуне Майер отметил, изучая работы Лавуазье, что при жарких температурах происходит меньшее потребление энергии. По прибытии на сушу у членов экипажа началась лихорадка, поэтому с лечебной целью делали кровопускания. Майер обнаружил, что во время осуществления кровопускания венозная кровь очень яркая, насыщенная и похожа на артериальную кровь. Из этого он сделал заключение, что в условиях жаркого климата кислорода из крови на окислительные процессы тратится меньше. Далее Р. Майер пришел к выводу, что энергия, которая поступает в организм, равна тому количеству энергии, которое выделяется [dendrit.ru/page/show/mnemonick/...].

Так, изучение чисто физиологических явлений привело к фундаментальному закону природы – закону сохранения и превращения энергии, сформулированному в виде первого Начала (закона) термодинамики. Ее основополагающие принципы сформулированы в трудах

П.Д. Джоуля*, С. Карно**, Р.Ю.Э. Клаузиуса***, У.Т. Кельвина****, Л.Е. Больцмана*****.



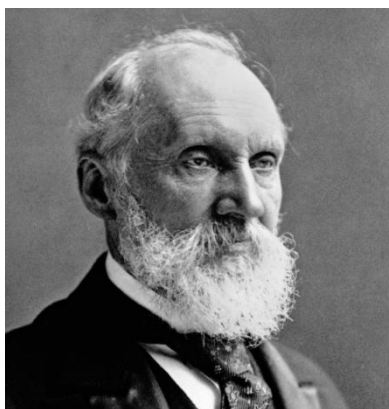
П.Д. Джоуль
(1818 – 1889 гг.)



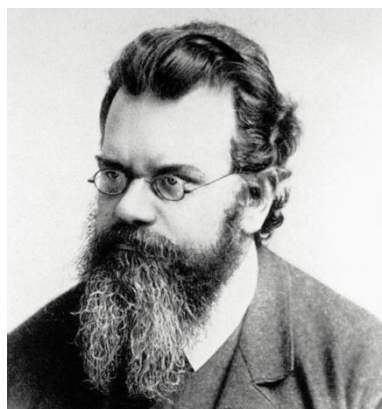
Н.Л.С. Карно
(17967 – 1832 гг.)



Р.Ю.Э. Клаузиус
(1822 – 1888 гг.)



У.Т. Кельвин
(1824 – 1907 гг.)



Л.Е. Больцман
(1844 – 1906 гг.)

* Джеймс Прескотт Джоуль (*James Prescott Joule*) – английский физик, внесший значительный вклад в становление термодинамики. Обосновал на опытах закон сохранения энергии. Установил закон, определяющий тепловое действие электрического тока. Вычислил скорость движения молекул газа и установил её зависимость от температуры.

** Николя Леонар Сади Карно (*Nicolas Léonard Sadi Carnot*) – более известный как Сади Карно – французский физик и математик.

*** Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус (*Rudolf Julius Emanuel Clausius*) – немецкий физик, механик и математик.

**** Уильям Томсон, барон Кельвин (*William Thomson, 1st Baron Kelvin*) – британский физик и механик. Известен своими работами в области термодинамики, механики, электродинамики.

***** Людвиг Больцман (*Ludwig Eduard Boltzmann*) – австрийский физик-теоретик, основатель статистической механики и молекулярно – кинетической теории. Член Австрийской академии наук (1895), член – корреспондент Петербургской академии наук (1899) и ряда других.

ЛИТЕРАТУРА

1. а) Клочков, В.В. Механика (Курс общей физики). Конспекты лекций для студентов нефизических специальностей [Электронный ресурс] / В.В. Клочков, А.Р. Юльметов, А.В. Аганов. – URL: <http://shelly.kpfu.ru/portal/docs/F1448360368/ConspectiLekziiMehaniKa2013.pdf> – 63 с.; б) Клочков, В.В. Молекулярная физика и термодинамика (Курс общей физики). Конспекты лекций для студентов нефизических специальностей [Электронный ресурс] / В.В. Клочков, А.Р. Юльметов, А.В. Аганов. – URL: <http://shelly.kpfu.ru/portal/docs/F445205646/ConspectMolPhizikaLekzii2013.pdf> – 42 с.; в) Савельев, И.В. Курс общей физики: в 4 т. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика : учебное пособие / И.В. Савельев; под общ. ред. В.И. Савельева. – 2-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2012. – 528 с.; г) Иродов, И.Е. Механика. Основные законы / И.Е. Иродов. – 9-е изд. – М. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 309 с.; д) Иродов, И.Е. Физика макросистем. Основные законы: учебное пособие / И.Е. Иродов. – 4-е изд. – М. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 207 с.; е) Аганов, А.В. Физика вокруг нас. Качественные задачи по физике. Около 1500 задач с подробными решениями: учебное пособие [Текст] / А.В. Аганов, Р.К. Сафиуллин, А.И. Скворцов, Д.А. Таюрский / Предисл. А.И. Фишмана. Изд. 4-е. – М.: Ленланд, 2015. – 336с. (НАУКУ – ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы (физика). №93); ж) Черняев, А.П. Лекции по физике. Курс физики для медиков [Текст] / А. П. Черняев. – Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Физ. фак. – Москва: URSS, 2010. – 353 с.
2. Биомеханика. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Биомеханика> (дата обращения 12.05.2016).
3. а) Вес. Невесомость. Перегрузки / Проект по физике на тему: «Сила гравитационного притяжения тел и ее влияние на их движение», Московский комитет образования, средняя образовательная школа №119 ЮЗАО. – Москва, 2002. – URL: sch119comp4.narod.ru/02.htm (дата обращения 08.06.2017); б) Дубровский, В.И. Перегрузки и невесомость. Движение в безопорном пространстве. Искусственное

тяготение [Электронный ресурс] / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова Биомеханика: Учеб. для сред, и высш. учеб, заведений. — М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. — 672 с.: ил. ISBN 5-305-00101-3. — URL: mir.zavantag.com/sport/871949/ (дата обращения 16.06.2017); в) Vuzlit.ru. Медицина. Пассивные механические свойства биологических тканей – Механические процессы в легких [Электронный ресурс]. — URL: https://vuzlit.ru/836187/mehanicheskie_protssesy_legkih (дата обращения 01.03.2019).

4. а) Механические свойства живых тканей [Электронный ресурс]. — URL: <http://helpiks.org/4-84333.html> (дата обращения 01.07.2017); б) Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. — 4-е изд., перераб. и дополн. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. — 656 с.
5. а) Биомеханическая мускульная работа. Студопедия [Электронный ресурс]. — URL: https://studopedia.ru/8_36949_biomehanicheskaya-muskulnaya-rabota.html (дата обращения 16.06.2016); б) Зациорский В.М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В.М. Зациорский, А.С. Аруин, В.Н. Селуянов. — М.: Физкультура и спорт, 1981. — 143 с.
6. а) Латфуллин, И.А. Нарушения сердечного ритма и проводимости: электрокардиографическая диагностика и ургентная терапия: учебная монография [Текст] / И.А. Латфуллин, О.В. Богоявленская, Р.И. Ахмерова, Х.М. Вахитов — Москва: ГОУ ВУНМЦ МЗ РФ, 2000. — 86 с.; б) Латфуллин, И.А. Атеросклероз. Краткие сведения истории развития, причины, патогенез заболевания, факторы риска, принципы профилактики [Текст] / И.А. Латфуллин. — Казань: Издательство Казанского университета, 2015. — 144 с.; в) Медицинская и биологическая физика. Курс лекций с задачами : учеб. пособие / В.Н. Федорова, Е.В. Фаустов. — 2008. — 592 с. [Электронный ресурс]. — URL: http://vmede.org/sait/?id=Medbiofizika_fedorov_2008&menu=Medbiofizika_fedorov_2008&page=11 (дата обращения 26.06.2016).
7. а) Слух человека. Потеря слуха. Восстановление слуха. — URL: http://www.i-kiss.ru/rubrika/sluh_cheloveka (дата обращения 03.07.2016); б) Теоретические основы электротехники. — URL: <http://uchebana5.ru/cont/3465161-p28.html> (дата обращения 03.07.2016).

- 03.07.2016); в) Савельев, И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982. – 493 с.; г) Эффект Доплера в СТО. – URL: <http://www.fizportal.ru/effekt-doplera> (дата обращения 03.07.2017).
8. а) Чем отличается стетоскоп от фонендоскопа? – URL: <http://thedifference.ru/otlichie-stetoskopa-ot-fonendoskopa/> (дата обращения 06.07.2016); б) Сердечная тупость. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сердечная_тупость (дата обращения 03.07.2016); в) Ультразвук. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ультразвук> (дата обращения 03.07.2016); г) Инфразвук. – URL: <http://ru.enc.tfode.com/Инфразвук> (дата обращения 03.07.2016).
9. а) Самые высокие города мира Ла-Риконада, Перу. – URL: http://enakievets.info/publ/ehto_interesno/planeta/samye_vysokie_i_nizkie_goroda_mira/10-1-0-1095 (дата обращения 05.07.2016); б) Питание в туристическом путешествии. – URL: http://tourlib.net/books_tourism/pitanie07.htm (дата обращения 05.07.2016).
10. Криобиология. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Криобиология> (дата обращения 18.07.2016).
11. Технический словарь, Т.2. – URL: <http://www.ai08.org/index.php/term/5796-oblast-sostoyaniy-veschestvo.xhtml> (дата обращения 15.07.2016).
12. Воронин, Е.С. Ветеринарная микробиология и иммунология. Электронный дидактический комплекс [Электронный ресурс] / Е.С. Воронин, В.Н. Кисленко, Н.М. Колычев, В.И. Плешакова. – URL: <http://nsau.edu.ru/images/vetfac/images/ebooks/microbiology/stu/bacter/ecologia/temper.htm> (дата обращения 20.07.2016).
13. Атмосфера земли и физические свойства воздуха. – URL: <http://avia-simply.ru/atmosfera-zemli-svojstva-vozduha/> (дата обращения 07.07.2016).
14. а) Высотная болезнь. – URL: <http://studentdoctorprofessor.com.ua/ru/node/1417> (дата обращения 05.07.2016); б) Реологические свойства крови и их влияние на механизм агрегации эритроцитов. – URL: http://www.medical-facilities.ru/articles/articles_649.html (дата обращения 05.07.2016); в) Микроскопия нативной крови. – URL: <http://mnб.ucoz.com/publ/ehritrocity/1-1-0-6> (дата обращения 05.07.2016).

- 07.07.2016); г) Гипертония в городах России, Москва. – URL: http://www.atlas-yakutia.ru/weather/climate_russia-VII_g.html (дата обращения 08.07.2016); д) Влияние авиаперелётов на здоровье. – URL: <http://www.avia77.ru/advice/flight-and-health/> (дата обращения 09.07.2016).
15. Глубоководная водолазная техника / В.А. Вишняков, И.В. Меренов. – Л.: Судостроение, 1982. – 237 с. // § 2. Воздействие газов на организм человека под повышенным давлением. – URL: https://sinref.ru/000_uchebniki/05599_vodolaz/101_glubokovodnaia_vodolaznaia_tehnika_veshnikov_1982/004.htm (дата обращения 10.07.2016).
16. а) Сивухин, Д.В. Общий курс физики: в 3 т. – М.: Наука, 1990. – Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. – 591 с. – URL: <http://alexandr4784.narod.ru/sdvt2.html> (дата обращения 11.07.2016); б) Осмотическое давление. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Осмотическое_давление (дата обращения 12.07.2016).
17. а) Клиническая фармакокинетика: теоретические, прикладные и аналитические аспекты: руководство / Под ред. В.Г. Кукеса. – 2009. – 432 с. – URL: http://vmede.org/sait/?id=Farmakologija_klin_farm_kykes_2009&menu=Farmakologija_klin_farm_kykes_2009&page=5 (дата обращения 12.07.2016); б) Регистр лекарственных средств России РЛС Пациент 2003. – Москва, Регистр Лекарственных Средств России, 2002. – URL: http://www.rlsnet.ru/books_book_id_2.htm (дата обращения 14.07.2016).
18. Нельсон, Д. Основы биохимии Ленинджера в 3 т. Т. 2: Биоэнергетика и метаболизм. [Электронный ресурс] / Д. Нельсон, М. Кокс. – Электрон. дан. – М.: Издательство «Лаборатория знаний», 2015. – 693 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/90237> – Загл. с экрана.
19. Большая советская энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия. 1969–1978.
20. Зедлаг, У. Животный мир Земли [Текст] / У. Зедлаг – М.: Мир, 1975. – 204 с.

Учебное издание

Аганов Альберт Вартанович

МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Часть 1

Механика.

Молекулярная физика

Подписано в печать 06.03.2019.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Формат 60х84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 19,53.

Тираж 200 экз. Заказ 274/2

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

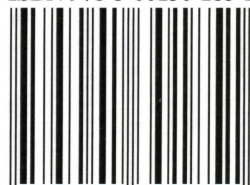
420008, г. Казань, ул. Профессора Нужи́на, 1/37

тел. (843) 233-73-59, 233-73-28



***Аганов Альберт Вартанович** – заслуженный профессор Казанского федерального университета (КФУ), заслуженный деятель науки Республики Татарстан и Российской Федерации, декан физического факультета и директор Института физики КФУ (до 2015 года), заведующий кафедрой медицинской физики. А.В. Аганов – автор (соавтор) более 400 публикаций, в том числе монографий и учебников.*

ISBN 978-5-00130-185-1



9 785001 301851 >