

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ
ДЕТЕЙ И ВЗРОСЛЫХ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Троицк

2018

Данное учебное пособие предназначено для подготовки к вступительным испытаниям по биологической физики, проводимым вузом самостоятельно. Каждый раздел включает в себя теоретический материал, примеры решения задач и задания для самостоятельной работы.

СОСТАВИТЕЛЬ:

Шталева Н.Р. – доцент
кафедры естественнонаучных дисциплин

Общие положения

Данное пособие предназначено для дополнительной подготовке детей и взрослых по Биологической физики.

Основная цель программы состоит в оказании помощи по усвоению основного алгоритма построения решения физических задач и так же надлежащего текстуального представления этого решения при письменной форме сдачи экзамена по биологической физики, проводимого вузом самостоятельно.

Для отработки навыков рационального использования при решении задач соответствующего математического аппарата в данном пособии в качестве вводного раздела представлено "Математическое обеспечение курса биологической физики". В этом разделе основные вопросы элементарной математики, крайне необходимые при изучении биологической физики, воспроизведены в форме, адаптированной к физической терминологии.

Изложение материала, представленного в разделах, каждый из которых посвящен соответствующей части курса биологической физики, приведено по единой схеме, состоящей из перечня программных вопросов по данной части, краткой сводки основных понятий, законов и определений, подробного анализа и письменного оформления решения ряда типовых задач, подбора задач для самостоятельной работы, а также тренировочных тестов по всем разделам биологической физики.

УДК. 371.3

ББК 74.20

С. 64

Старченко С. А. Биофизика: Учебное пособие для 10 кл., школ и лицеев с углубленным изучением естественно-научных дисциплин. - Челябинск: Изд-во "Факел", 1997. - 132 с.

В учебнике излагаются вопросы школьной программы биофизики, изучающиеся в общеобразовательных школах и лицеях естественно-научного профиля. Содержание включает в себя разделы "Биомеханика", "Гемодинамика", "Биоакустика".

Книга может быть использована при подготовке к вступительным экзаменам в медицинские и ветеринарные вузы.

Научный консультант: Тульжибаева Н. Н., доктор педагогических наук, профессор Челябинского государственного педагогического университета.

Рецензенты: Кабыш А.А., действительный член РАЕ, Заслуженный деятель науки РФ, доктор ветеринарных наук, профессор Уральского института ветеринарной медицины.

Байтунгер Е.М., доктор физико-математических наук, профессор Челябинского государственного педагогического университета.

Художник Белоусов Д.Л.

Учебник напечатан на спонсорские средства АО "Троицкий жировой комбинат".

ISBN № 5-85716-103-10

© С.А. Старченко

© Издательство ЧГПУ "Факел", 1997.

Отпечатано в ЗАО «Типография им. Сыромолотова», г. Троицк

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Предмет биофизики.

ЧТО ИЗУЧАЕТ БИОФИЗИКА.

С расширением и углублением знаний о живых организмах появились новые разделы науки, которые изучают процессы и явления, относящиеся одновременно к различным областям познания. К таким научным дисциплинам относится биологическая физика или биофизика.

Известно, физика изучает основные законы неживой природы, ее строение и свойства. Изучением свойств живых объектов реального мира занимается биология. Биология - наука о живой природе.

Где грань между живым и неживым реальным миром? На этот вопрос пытаются ответить многие науки и делают это. Ведущее место в решении поставленной проблемы отводится биофизике.

Биофизика - это естественная наука о физико-химических явлениях и процессах в живых объектах, находящихся в неразрывной связи с окружающей средой.

Объектами биофизического исследования являются живые системы. Это может быть отдельная клетка, орган, целый организм и т.п. Изучая на разных уровнях закономерности строения живого, биофизика вскрывает сущность их фун-

кционирования, используя при этом физические законы, явления, теории.

В основе жизнедеятельности организма лежат законы природы, относящиеся к различным научным знаниям. Однако, биологические знания имеют свои качественные особенности. Только биологические дисциплины решают проблемы возникновения и эволюции жизни на нашей планете, развития организма из одной клетки, поведения животных, качественного отличия человека от всех представителей живого. Но при этом фундаментальные законы физики справедливы и реализуются на живых существах. Поэтому применение физических знаний в исследовании живых существ способствует познанию сути живого.

Биофизика вскрывает важные особенности взаимосвязи вещества, энергии, информации в биологических объектах. Жизнь, с позиций биологии, - это процесс сложного взаимодействия вещества, энергии и информации.

Биофизика показывает справедливость для биологии фундаментальных законов сохранения и симметрии. Помимо этого, с во-

зий современной физики, биофизика решает широкий круг более частных проблем. К ним следует отнести исследования структуры белков и нуклеиновых кислот, механизмы работы ферментов, транспорт веществ через мембранные структуры, биоэнергетические процессы, фотосинтез, молекулярные основы биологической подвижности, физические механизмы восприятия света и звука.

ОСОБЕННОСТИ БИОФИЗИКИ. Материальный мир един. Биофизика - это синтезированная наука, она использует методы познания, характерные для таких наук, как биология, физика, химия, математика, кибернетика, физхимия, биохимия и др.

Роль биофизики заключается в том, чтобы раскрыть взаимоотношения физической и биологической форм движения материи. Ведущее место при этом отводится биологической форме. Следует иметь в виду, что взаимоотношение физической и биологической форм движения материи может рассматриваться и через химическую форму движения. (Рис.1) Чтобы понять целостное единство реального мира, необходимо рассматривать взаимоотношение физической, химической и биологической формы движения материи.

Перечислим основные направления взаимосвязи физики и биологии, рассматриваемые биофизи-

кой:

1. Биофизика исследует влияние физических факторов на живые

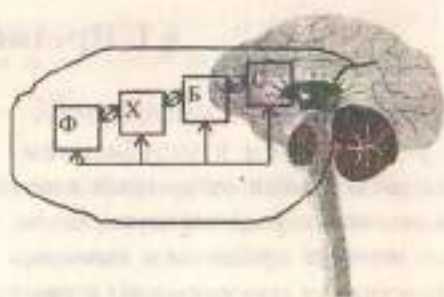


Рис.1

организмы.

Уже сегодня известны условия существования и развития живых организмов в космосе и на планетах, определены физические факторы, обеспечивающие протекание физико-химических реакций,

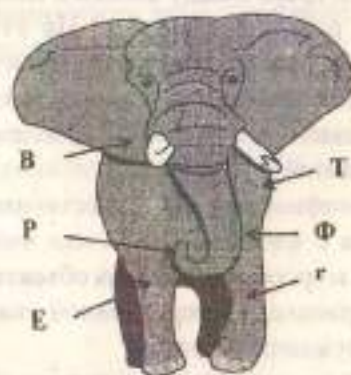


Рис.2

приводящих к образованию белковых тел, определены природные

условия, реализующие многообразие видов и типов живого.

2. Протекание физических явлений и законов в биообъектах. Изучение нервной и выделительной системы, системы кровообращения и дыхания в биофизике рассматривается с позиций протекания физических и физико-химических процессов, а также физических закономерностей, определяющих механизмы существования этих систем.

Система кровообращения человека функционирует благодаря реализации законов гидродинамики. Однако при этом учитываются особенности и свойства крови.

В оптической системе глаза реализуются законы отражения и преломления света, осуществляется ход лучей по законам геометрической оптики.

3. Применение в исследовании



Рис.3

биологических объектов современными физическими методами и приборов. Электронные микроскопы позволяют увеличить микроскопические биообъекты в сотни тысяч раз. Электронный парамагнитный резонанс обеспечивает изучение



Рис.4

особо активных биологических молекул, играющих важную роль в обмене веществ.

Современная биофизика рассматривает молекулярный и атомарный уровень организации биообъектов. Для исследования биоструктур на этом уровне необходимы современные физические и физико-химические методы. Использование этих методов позволяет вскрыть сущность цветового зрительного восприятия, понять механизмы обменных процессов.

СВЯЗЬ БИОФИЗИКИ С ДРУГИМИ НАУКАМИ. Биофизика тесно связана прежде всего с биологией и физикой. Она оказывает большую помощь биологии в тео-

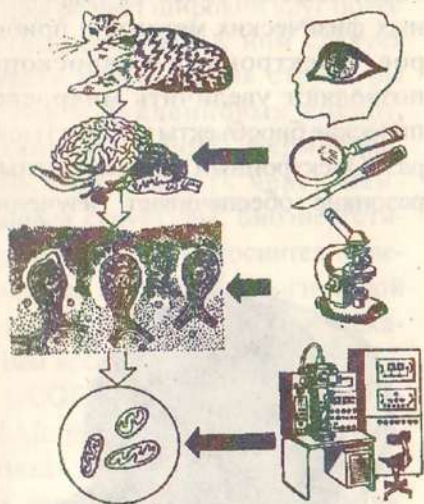


Рис.5

ретическом обобщении, а физике - в расширении границ ее применения. Рассматривая физические явления, протекающие в организме, биофизика доказывает, что явления неживой природы могут быть реализованы на более сложном биологическом уровне.

В связи с тем, что биофизика - биологическая дисциплина, она тесно связана с физиологией, неврологией, офтальмологией, фармакологией. В связи с этим комплексные исследования биохимиков, физиологов позволили получить представление о строении и свойствах биологических веществ, механизмах действия клеточных мембран.

Успешно используется в науке физико-математическое моделирование биологических процессов,

которые позволяют описать кинетику транспорта веществ в клетке. Значительное влияние на биофизику при этом оказывает развитие кибернетики и теории информации. Так с помощью математического аппарата этих дисциплин стал возможен анализ явлений, происходящих в клетке.

Помимо перечисленных связей биофизика тесно контактирует с практическими науками, такими, как медицина, ветеринария, экология. Использование современных биофизических методов и знаний позволяет усовершенствовать диагностику, профилактику и лечение живых существ, провести оценку качества продуктов питания, состояния окружающей среды и природы.

РАЗВИТИЕ БИОФИЗИКИ. Развитие биологии совпадает с началом развития физики, поэтому их взаимодействие имеет давнюю историю. Декарт в XVII веке искал объяснение кровообращения, используя законы механики. Хотя механистические представления этой эпохи очень наивны, для своего времени они имели прогрессивное значение.

Открытие электрических явлений Гальвано связаны с исследованием стимуляции мышечного сокращения. Исследуя причины возбуждения мышцы, Гальвано доказал тождественность живого и мышечного электричества.

В 1780 году А.Лавуазье показал

единство горения и дыхания, а Ф.Веллер синтезировал мочевины из неорганических веществ.

Большой импульс развития получила биология после того, как братья Янсоны создали первый микроскоп, с помощью которого Гук сделал первые зарисовки клетки, а Левенгук увидел в капле воды простейшие организмы.

После разработки Ч.Дарвиным теории эволюции, открытия Менделеем фундаментальных законов генетики биология стала оказывать существенное воздействие на физику. Биологом Майером был открыт закон сохранения энергии. Ученый обратил внимание на то, что у людей в тропиках венозная кровь по яркости окраски приближается к артериальной. На основании этого Майер сделал вывод, что при высокой температуре воздуха окисление, создающее организму теплоту, мало и количество углекислоты в крови невелико. Он показал, что тепло, работа и энергия в организме могут превращаться друг в друга, т.е. реализуется первый закон термодинамики.

Основоположник статистической механики Л.Больцман в XIX веке решил задачу механического обоснования эволюции физических систем. Эта эволюция описывается вторым началом термодинамики, согласно которому изолированная физическая система эволюционирует к равновесному состоянию.

Дальнейшее развитие идей Больцмана положило начало научному обоснованию существования открытых термодинамических систем.

Во второй половине XIX и начале XX веков начинаются исследования физиологических процессов в живом организме. В частности, Гельмгольц опираясь на физические теории обосновал зрительное и слуховое восприятие. В 1912 году И.Бернштейн открыл биопотенциалы и определил природу нервного возбуждения.

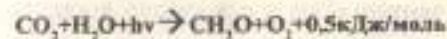
В 1945 году появилась классическая работа Э.Шредингера, ученого физика, одного из создателей квантовой механики - "Что такое жизнь, с точки зрения физики", в которой он заложил основы развития современной молекулярной биологии.

Таким образом, на протяжении веков определялась система взглядов, представляющих синтез положений физики и биологии, формировались биофизические теории, раскрывающие сущность биологической терморегуляции, биологического электричества, механизмы зрительного и слухового восприятия, транспорта веществ через биомембраны.

СОВРЕМЕННАЯ БИОФИЗИКА. В настоящее время биологическая физика испытывает интенсивное развитие. После открытий рентгеновского излучения, явления

естественной радиоактивности, создания быстро действующей осциллографической техники, разработки спектрографических методов, методов меченых атомов, познание биообъектов продвинулось на уровень молекулярной и атомной биофизики. Сегодня в биофизике выделяются такие крупные направления, как молекулярная биофизика, биофизика клетки, биофизика процессов управления.

Молекулярная биофизика изучает свойства биологических молекул, физико-химические процессы в рецепторных клетках, т.е. раскрывает физиологические механизмы, протекающие в органах зрения, слуха, обоняния. Молекулярная биофизика изучает не только живые существа, но и растения. В качестве примера можно рассмотреть явление фотосинтеза. Фотосинтез протекает в зеленых частицах - хлоропластах, находящихся в клетках листа. В хлоропластах содержится растительный пигмент - хлорофилл, который поглощает фотоны света и обеспечивает протекание реакции с выделением кислорода.



Другой раздел - биофизика клетки - изучает клеточные и субклеточные системы. Известна способность свечения живых организмов. Это явление называется биолюминесценцией. Оно обусловлено проте-

канием физико-химических реакций внутри клеток и связано с внутриклеточным окислением липидов. По интенсивности сверхслабого свечения можно судить о характере протекания обменных реакций внутри клеток.

В клетке живого организма происходит поглощение и выделение необходимых веществ. Кроме того, клетки сетчатки глаза определяют силу и качество света, клетки слизистой носа фиксируют запах вещества, клетки различных желез выделяют физиологически активные вещества - ферменты и гормоны, которые регулируют рост и развитие организма.

Живые клетки организма тесно связаны между собой и с головным мозгом - главным управляющим центром. В клетках, в их структурных элементах происходит протекание биохимических реакций. Благодаря чему так согласованно и точно совершаются тысячи реакций? Дело в том, что клетка, отдельный орган и целостный ор-

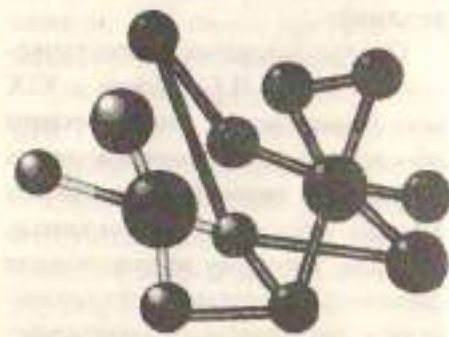


Рис.6

ганизм представляют систему, функционирующую по законам саморегуляции и взаимосвязи. Эти законы изучает самый молодой раздел - биофизика процессов управления и регуляции. Это важное направление биофизики опирается на кибернетику. Исследование процессов регуляции в организме показало, что они обладают свойством саморегуляции. Клетки, ткани, органы представляют собой саморегулирующиеся, самоорганизующиеся, самонастраивающиеся, самообучающиеся системы. Каждая клетка или орган самостоятельно, без помощи извне, регулирует состав среды внутри себя. Если под воздействием какого-либо фактора их состояние изменяется, то возникают механизмы, нормализующие состояние клетки. На рис. 7 представлено распределение хлоропласты в клетках при сильном и слабом ее освещении.

Биофизика положила начало новым отраслям биологических знаний. Так выделилась в самостоятельную отрасль биологии радиобиология - наука о действии радиации на живые организмы. Космическая биология изучает проблемы жизни в космосе. Механохимия исследует превращение химической энергии в механическую. На основе биофизических исследований возникла наука бионика, изучающая живые организмы с целью использования принципов их работы для

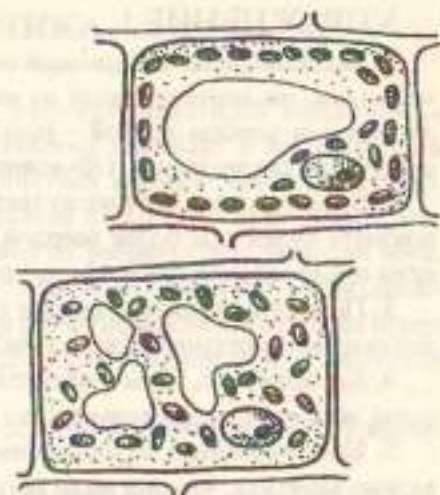


Рис. 7

создания совершенных систем и конструкций.

ВОПРОСЫ:

1. Какие естественнонаучные дисциплины вам известны? Что изучают эти дисциплины?
2. Знания каких научных дисциплин входят в биофизику?
3. Почему принято считать, что биофизика - отрасль биологических знаний?
4. Охарактеризуйте основные уровни организации живого организма.
5. Перечислите отличительные признаки биофизики как науки.
6. Какие направления взаимосвязи физики и биологии прослеживаются в биофизике? Приведите примеры этих направлений взаимосвязи.
7. Приведите известные вам примеры связи биофизики с другими науками.
8. Назовите известных вам ученых - биологов и физиков, внесших вклад в развитие биофизики.
9. Приведите примеры прикладного и фундаментального значения биофизики.
10. Объясните, почему современная биофизика развивается в направлении познания микроструктуры материи.

УПРАЖНЕНИЕ 1.

1. Гальвано делал следующий опыт. Соединив две проволоки из различных металлов, он концом одной из них касался лапки свежепрепарированной лягушки, а концом другой - поясничных нервов; при этом мускулы лапки судорожно сокращались. Объясните это явление.

2. Зубы человека состоят из твердого вещества - дентина, а поверхность их покрыта слоем еще более твердой, но хрупкой эмали. Почему зубы портятся, если после горячей пищи принимать холодную и наоборот?

3. Почему нам жарко уже при температуре $+25^{\circ}\text{C}$, хотя в это время воздух значительно холоднее нашего тела?

4. Как известно, куры с наступлением сумерек совсем перестают видеть, а совы, наоборот, видят только в это время. Почему?

5. Если наблюдать за находящимися в воде водоплавающими птицами, то можно заметить, что они мало погружаются в воду. Объясните почему?

БИОМЕХАНИКА.

Биомеханика - раздел биофизики, рассматривающий проявление механических закономерностей в биологических системах и исследующий ответы этих систем на механические воздействия внешних факторов среды. Поскольку с механикой связано начало развития физики, не удивительно, что биомеханические исследования начались еще на раннем этапе развития наук. Известно, что еще Леонардо да Винчи оставил много заметок по механике летательных и шагающих движений. Бурное развитие механики открыло перед биомеханикой новые перспективы. В последнее время возникли и развиваются следующие направления биомеханики:

- инженерная биомеханика, изучает основы робототехники и роботостроения;
- медицинская биомеханика, исследует причины, последствия и способы профилактики травматизма, прочность опорно-двигательного аппарата, вопросы протезирования;
- эргономическая биомеханика, изучает оптимизацию взаимодействия человека с окружающей средой;
- спортивная биомеханика, рассматривает двигательную деятельность человека во время спортивных тренировок и соревнований.

§ 2. Описание механических движений живых существ.

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Часто, исследуя движение живых существ, измеряют количественные характеристики механического состояния биообъекта. Иначе, регистрируют биомеханические характеристики: размеры, пропорции, распределение масс, подвижность биологических объектов.

Биомеханическими характеристиками называются величины, используемые для количественного описания и анализа механического движения живых существ. Все

биомеханические характеристики классифицируются на кинематические, динамические и энергетические. Кинематические - характеризуют внешнюю картину двигательной деятельности, динамические - несут информацию о причинах изменения движений, энергетические - дают представление о механической производительности и экономичности движения.

Биомеханические характеристики описывают поступательные и вращательные движения. Поступательным называется такое движе-

ние, при котором все точки тела перемещаются по параллельным траекториям. При вращательном движении точки тела перемещаются по круговым траекториям, центры которых лежат на оси вращения.

В большинстве движений биологических объектов поступательный

и вращательный компоненты присутствуют одновременно, такое движение называется составным. Причем двигательный аппарат живых существ устроен так, что все движения образуются из комбинаций вращательных и поступательных движений.

Классификация биомеханических характеристик

Биомеханические характеристики				
Кинематические		Энергетические	Динамические	
Поступательное движение	Вращательное движение	Поступательное и вращательное движение	Поступательное движение	Вращательное движение
(м) Перемещение (гр.)		Работа (Дж)	Масса (кг)	Момент инерции ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$)
(с) Длительность (с)		Энергия (Дж)	Сила (Н)	Момент силы ($\text{Н} \cdot \text{м}$)
(м/с) Скорость (гр/с)		Мощность (Вт)	Импульс силы ($\text{Н} \cdot \text{с}$)	Импульс момента силы ($\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$)
(м/с ²) Ускорение (гр/с ²)		Экономичность (%)	Количество движений ($\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$)	Кинетический момент ($\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$)
(с ⁻¹) Темп-ритм (с ⁻¹)		Энергетическая стоимость (Дж/м)		

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Кинематические характеристики биообъекта - это величины, описывающие положение и движение объекта в пространстве во времени. В связи с этим выделяют пространственные, временные и пространственно - временные характеристики.

Положение любой точки тела (например, сустава) или летящего комара определяется координатами

в заданной системе координат. Наиболее приемлема прямоугольная система, в которой положение тела в пространстве определяется его координатами. На рис.8 дано схематическое изображение гимнастки, выполняющей упражнение на равновесие.

При выполнении двигательного действия положение тела меняется, меняются и его координаты. При этом точки тела описывают в пространстве воображаемые линии -

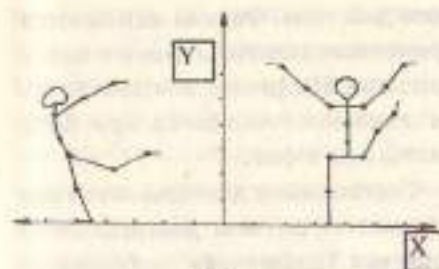


Рис.8.

траектории.

Траектории движения живых существ могут иметь сложную форму.

В отличие от траекторий, перемещение определяет расстояние по

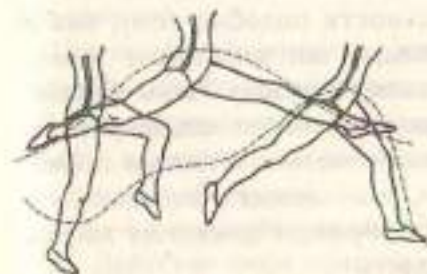


Рис.9

прямой между конечным и начальным положением движущегося тела. Перемещение всегда имеет направление и измеряется в единицах длины.

При вращательном движении положение тела характеризует угловое перемещение. Угловое перемещение - это угол поворота тела или отдельного сегмента. Угловое перемещение измеряется в градусах.

Следующая характеристика движения биообъекта - скорость. Скорость показывает, как быстро изменяются координаты тела.

Биообъекты движутся с различными скоростями. Это связано с особенностями физиологического строения двигательного аппарата живых существ, их средой обитания.

Скорость движения некоторых живых существ представлена в таблице.

Живые существа	Скорость движения (м/с)
Улитка	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Черепашка	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Человек	1,5
Рыба	1,7
Муха	5,0
Лошадь	8,3
Собака	25
Гепард	31
Страус	34
Рыба-меч	40

Скорость может характеризовать поступательное и вращательное движение тела, поэтому выделяют линейную и угловую скорость.

Быстроту изменения скорости биообъекта, как и любого тела, характеризует линейное и угловое ускорения. Определяющие формулы величин и законы изменения перемещения, скорости, ускорения от

времени известны из курса физики.

Следует отметить, что перемещение, скорость и ускорение тела зависит от тела отсчета, относительно которого рассматривается движение. Например, при беге скорость руки или ноги относительно общего центра масс определяется с учетом скорости общего центра масс относительно дорожки. Закон относительности движения необходимо учитывать при определении механических энергозатрат и выявлении энергетически оптимальных режимов двигательной деятельности.

Временные биомеханические характеристики описывают протяженность изменения процессов или явлений. При описании периодически повторяющихся движений живых существ важно знать: темп, ритм, фазу движения, длительность цикла движения.

Темп движения - это число движений в единицу времени.

Длительность цикла движения - интервал времени между одинаковыми фазами повторяющегося движения.

Темп и длительность цикла связаны между собой следующим соотношением:

$$T = \frac{1}{N}$$

При рассмотрении кинематических характеристик, описывающих движение живых существ, важным понятием является фаза двигатель-

ного действия. Фазами называются временные элементы двигательных действий. Например, повторяющиеся движения человека при беге состоят из 6 фаз.

Соотношение длительностей фаз называется ритмом двигательного действия. Графическое изображение ритма называется хронограммой. Она изображена на рис. 10.

Фазовый анализ двигательной деятельности живых существ - один из самых полезных методов, применяемых при биомеханическом анализе движения. Определение длительности фаз, ритма и построение хронограммы позволяют фиксировать элементы двигательной деятельности подобно тому, как с помощью нот записывают и воспроизводят музыку. Таким образом, возникает возможность документирования техники и тактики движения, записывания и изучения лучших образцов движения живых существ.

ДИНАМИЧЕСКИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. В отличие от кинематических характеристик, динамические невозмож-

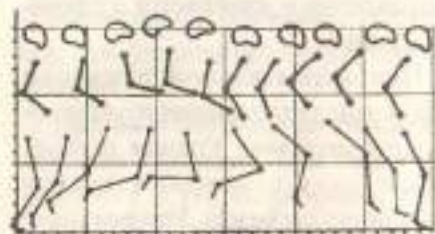


Рис. 10

но оценить по внешней картине движений. При оценке динамических биомеханических характеристик всегда требуются измерительные приборы и оборудование. Динамические характеристики раскрывают сущность возникновения движения, позволяют установить причинно - следственные связи сложных механизмов формирования движений биообъектов и определить оптимальные пути овладения, совершенствования и исправления движения.

Ошибки при движении всегда есть следствие несвоевременных и нерациональных мышечных усилий, неумелого использования внешних сил.

Причиной возникновения движения биообъекта является взаимодействие, которое возникает в самом объекте, или взаимодействие объекта с другими объектами.

Мерой взаимодействия является сила. Действие силы приводит к ускоренному движению объекта. Ускорение, приобретаемое биообъектом, пропорционально действующей силе и обратно пропорционально инертности тела. Из физики известны основные законы для поступательного и вращательного движения тел. Эти законы справедливы и для биообъектов. Математическая формулировка их следующая:

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

$$\beta = \frac{M}{J}$$

где F - сила, m - масса, M - момент силы, J - момент инерции.

Чтобы определить ускорение тела биообъекта при поступательном движении, достаточно знать величину силы и массы. При вращательном движении ситуация сложнее. Во-первых, инертность вращающегося тела определяется не только массой, а моментом инерции. Во-вторых, эффект действия силы в этом случае зависит не только от ее величины, но и от места приложения. Чем длиннее плечо, тем больше момент силы или вращательный момент.

Поскольку ускорение есть изменение скорости в единицу времени, то значение изменения скорости для поступательного движения:

$$\Delta v = \frac{F \Delta t}{m}$$

а для вращательного движения:

$$\Delta \omega = \frac{M \Delta t}{J}$$

Тогда количество движения биообъекта зависит не только от величины силы, но и от продолжительности действия.

Можно выделить еще две биомеханические характеристики: импульс силы и импульс момента силы:

$$\Delta P = F\Delta t$$

$$\Delta K = M\Delta t$$

где Δt - интервал времени от начала до конца действия силы.

Итак, мы рассмотрели биомеханические характеристики, которые позволяют описать причинно-следственную связь возникновения движения биообъектов.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Любой живой организм обладает энергией и способен совершить работу.

Энергия есть единая форма движения и взаимодействия материальных объектов, а работа мера изменения энергетического состояния объектов. Человек создал машины и механизмы, которые совершают механическую работу за счет различных физических процессов. Механическая работа совершается мышцами человека за счет происходящих в них химико-физических явлений. Таким образом, механическую работу можно рассчитать по формуле:

$$A = F\Delta S$$

Например, для того, чтобы подняться по канату на высоту 5 метров, мальчик с массой тела 30 кг

выполняет работу 1500 Дж. Если этот подъем длится 10 с, то развиваемая мощность равна 150 Вт. Мощность характеризует быстроту изменения состояний объекта и определяется по формуле:

$$N = Fv$$

Механическая энергия может быть кинетической и потенциальной. Кинетическая энергия - энергия движения, потенциальная энергия взаимодействия. Совершаемая живым организмом работа осуществляется за счет изменения этих энергий. Кинетическая и потенциальная энергии при поступательном и вращательном движении определяется по формулам:

$$E_n = mgh \quad E_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$E_b = \frac{j\omega^2}{2}$$

Полная энергия движущегося биообъекта, согласно теореме Кеннига, равна сумме его потенциальной энергии и кинетической энергии при поступательном и вращательном движениях:

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

Как известно, механическая энергия идет не только на совершение работы, но часть ее обесценивается и превращается в тепло.

Подобно тому как в машинах имеются показатели, характеризующие полезное действие и экономичность двигателя, аналогичные показатели можно ввести для живого организма. Для оценки эффективности использования организмом энергии вводится коэффициент эффективности использования метаболической энергии. Коэффициент метаболической энергии - это отношение количества метаболической энергии, выделяемой в единицу времени к скорости ее расходования:

$$T = \frac{A}{E} 100\% = \frac{N}{V} 100\%$$

где E - количество метаболической энергии, V - скорость расходования энергии, N - количество метаболической энергии выделяемой в единицу времени.

Метаболическая энергия образуется в клетках организма в результате протекания биохимических реакций.

Для оценки эффективности движения биообъекта вводится понятие энергетическая стоимость метра. Энергетическая стоимость метра - это биомеханическая величина численно равная отношению скорости расходования энергии организмом к скорости его движения.

$$P = \frac{V}{v}$$

где V - скорость расходования энергии v - скорость объекта.

Многообразие живых существ, способов их передвижения выдвигает проблему анализа энергетической эффективности биологических конструкций живого. При таком анализе оказывается, что структура организма эволюционирует в направлении эффективного использования энергии для данного вида живых существ.

Энергетические характеристики живых организмов могут описывать свойства и явления, протекающие в организме. Часто их используют при конструировании технологических моделей, подобно повторяющих структуру живого объекта.

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Наряду с характеристиками, обладающими размерностью, имеются безразмерные биомеханические характеристики, выраженные числом без единиц измерения. В простейшем случае это может быть количество объектов, например, молекул, особей и т.п. При этом безразмерные величины характеризуют отношения, определяющие связь различных количеств или задающие отношение двух разных величин. Во многих уравнениях, содержащих степень, могут быть показатели степени безразмерные. В качестве типичного примера можно привести уравнение Больцмана:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Это уравнение характеризует распределение частиц при равновесном состоянии. В уравнении показатель степени безразмерная величина.

В практике применяется множество безразмерных параметров, которые позволяют проводить функциональное сравнение геометрически подобных систем. В качестве примера может служить число Рейнольда:

$$R_e = \frac{vl\rho}{\eta}$$

где v - скорость, l - характерная длина, ρ - плотность, η - вязкость.

Эта величина определяет характер движения тела в жидкости или газе. На практике, если реализуется условие равенства чисел Рейнольда для различных по размеру тел, движущихся в среде, говорят о их геометрическом подобии и о том, что эти тела имеют одинаковые картины обтекания. Тогда, например, свойства большого тела с малой скоростью можно сравнивать с малым телом, но имеющим большую скорость.

В медицине и ветеринарии очень часто приходится испытывать физиологический эффект различных лекарственных препаратов на

мелких животных, прежде чем рекомендовать его для человека. При этом обязательно проводят расчет безразмерных характеристик подобия.

Физиологическое подобие играет важную роль в спортивной медицине, фармакологии и многих других прикладных областях биологии. Так, например, возникают и решаются вопросы об установлении норм спортивных достижений для людей разного роста и конституции, о перенесении результатов испытаний лекарств с мелких млекопитающих на человека, о дозировке медикаментов для людей с разной массой тела и многое другое.

ВОПРОСЫ:

1. Что изучает биомеханика? 2. Что описывают кинематические биомеханические характеристики? 3. Что такое темп движения, длительность цикла, фаза двигательного действия? 4. Какие свойства биообъектов описывают динамические характеристики? 5. Из каких видов энергии состоит полная энергия движущего тела? 6. Для каких целей применяются безразмерные биомеханические характеристики? 7. Докажите, что число Рейнольда является безразмерной величиной.

§ 3. Двигательный аппарат человека.

СТРУКТУРА ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА. Двигательный аппарат человека - движущийся механизм, который состоит из 600 мышц, 200 костей и несколько сотен суставов. Эти цифры приближены, поскольку некоторые кости срослись друг с другом, а некоторые мышцы имеют несколько головок или делятся на пучки.

Биофизика изучает опорно-двигательный аппарат человека, преимущественно те особенности его строения, которые имеют значение для совершенствования движения. Двигательный аппарат рассматривается как упрощенная модель человека, как биомеханическая система.

Биомеханическая система человека состоит из биомеханических цепей, звеньев и сегментов. Множество частей тела, соединенных подвижно, образуют биокинематические цепи. К ним приложены силы (нагрузки), которые вызывают деформации звеньев тела и изменяют движение звеньев.

Звеном называется часть тела, расположенная между двумя соседними суставами. Например, звеньями тела являются: кисть, предплечье, плечо, голова и т.д.

В человеческом теле около 70 звеньев. Но в практике чаще всего рассматривается 15-звенная модель

человеческого тела (Рис. 11).

Каждое звено цепи состоит из более мелких структур - сегментов.

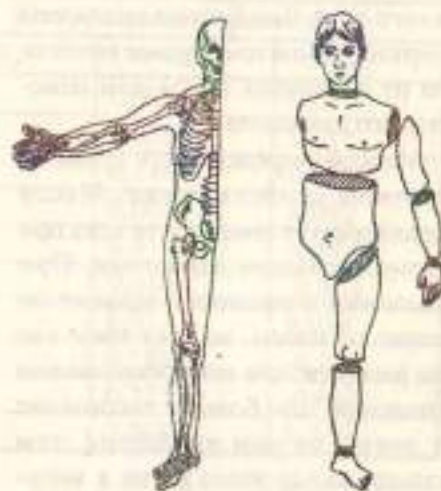


Рис. 11

В этом случае рассматривается 70-звенная модель.

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОРНО - ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА. Для описания инерциальных свойств тела человека вводится ряд биохарактеристик. Геометрией масс тела человека называется распределение масс между звеньями тела и внутри звеньев. Геометрия масс количественно описывается массинерциальными характеристиками. Важнейшими из них являются:

масса, радиус инерции, момент инерции и координата центра масс.

Масса биологического объекта - это количество вещества, содержащегося в теле или в отдельном звене. Вместе с тем, масса - это количественная мера инертности тела по отношению к действующей на него силе. Чем больше масса, тем инертнее тело и тем труднее вывести его из состояния покоя или изменить его движение.

Массой определяются гравитационные свойства тела. Масса характеризует инертность тела при поступательном движении. При вращении инертность зависит не только от массы, но и от того, как она распределена относительно оси вращения. Чем больше расстояние от звена до оси вращения, тем больше вклад этого звена в инертность тела. Количественной мерой инертности тела при вращательном движении является момент инерции тела. Это величина определяется по формуле:

$$j = mR^2$$

где R - радиус инерции или среднее расстояние от оси вращения до материальных точек тела.

Для упрощения расчета массы тела, цепи, звена, сегмента в биомеханике вводят понятие центр масс. Центром масс называется точка, где пересекаются линии действия всех сил, приводящих тело к поступательному движению и не вызывающих вращения тела. В поле

гравитации центр масс совпадает с центром тяжести. Центр тяжести - точка, к которой приложена равнодействующая сил тяжести всех частей тела. Положение общего центра масс тела определяется там, где находится центр масс отдельных звеньев.

А это зависит от позы и от того, как части тела расположены друг относительно друга в пространстве. На рис.12 представлено расположение центра масс отдельного звена.

У человека, стоящего в основной стойке, горизонтальная плоскость, проходящая через основной центр, находится примерно на уровне второго крестцового позвонка. В положении лежа центр масс смещается в сторону головы примерно на 1%; у женщин он расположен в среднем на 1-2% ниже, чем у мужчин; у детей школьного возраста он существенно выше, чем у взрослых.

РАСЧЕТ МАССЫ СЕГМЕНТА ТЕЛА. Экспериментальные иссле-



Рис. 12.

дования позволяют записать формулу расчета массы сегмента тела:

$$m_x = B_0 + B_1 m + B_2 H$$

где m_x - масса одного из сегментов тела (голова, стопы, бедра), m - масса всего тела; H - длина тела

Сегменты	Коэффициенты уравнения		
	B_0	B_1	B_2
Стопа	-0,83	0,008	0,007
Голень	-1,59	0,036	0,012
Бедро	-2,65	0,146	0,014
Кисть	-0,12	0,004	0,002
Предплечье	0,32	0,014	-0,001
Плечо	0,25	0,030	-0,003
Голова	1,30	0,017	0,014
Верхняя часть туловища	8,21	0,186	-0,058
Средняя часть туловища	7,18	0,223	-0,066
Нижняя часть туловища	-7,50	0,098	0,049

Зная массу и момент инерции звеньев тела, где расположен их центр масс, можно решать много важных практических задач: рассчитывать количество движения тела, момент импульса, определять степень устойчивости тела, оценивать и характеризовать условия управления движением отдельными сегментами и звеньями тела.

При вращательном движении относительно оси инертность человеческого тела зависит не только от массы, но и от позы, поэтому при оценке движения используют закон сохранения момента импульса. Суммарный момент импульса сис-

(см); B_0, B_1, B_2 - коэффициенты уравнения, они различны для сегментов и определяются по таблице.

Коэффициенты уравнения для вычисления массы сегментов тела человека приведены в таблице.

темы сохраняется при любых процессах, происходящих в этой системе:

$$j_1 \omega_1 = j_2 \omega_2$$

На рис. 13 изображена фигуристка, выполняющая вращательное движение. В позе А спортсменка вращается быстро, а в позе В вращение резко замедляется и затем прекращается. Это объясняется тем, что при отведении рук в сторону, увеличивается момент инерции тела фигуристки и уменьшается угловая скорость ее вращения.

РЫЧАЖНАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА. Механически опорно-двигательный аппарат можно рас-

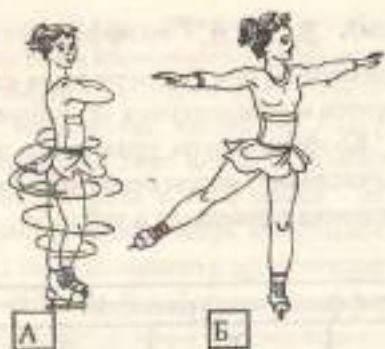


Рис. 13.

считать как систему рычагов, соединенных между собой шарнирно, к которым в определенных точках прикреплены способные укорачиваться эластичные тяги - мышцы.

Рычагом называется твердое тело, имеющее ось вращения, к которому приложены силы, создающие моменты относительно этой оси. Точки приложения сил могут находиться по разную сторону от оси - это рычаг первого рода (рис. 14 (а)) и по одну сторону рычаг второго рода (рис. 14 (б, в)).

Рычаг второго рода имеет две разновидности: первая, когда действующая сила F - приложена в конце рычага, а преодолеваемое сопротивление - сила R - ближе к точке опоры. При равновесии рычага действующая сила меньше преодолеваемой, т.е. рычаг дает выигрыш в силе, но проигрыш в перемещении. Такой рычаг называется рычагом силы. (Рис. 14, б). Вторая разновидность, когда дей-



Рис. 14

ствующая сила приложена ближе к точке опоры, чем преодолеваемое сопротивление. (Рис. 14, в). В этом случае действующая сила больше преодолеваемой, т.е. рычаг дает проигрыш в силе за счет выигрыша в перемещении. Такой рычаг называется рычагом скорости.

В опорно-двигательном аппарате человека большинство рычагов второго рода - рычаги скорости. Примером может быть предплечье.

Точка опоры в предплечии находится в локтевом суставе. Действующая сила - сила мышц сгибает предплечье. Сила сопротивления обусловлена весом предплечья и силой тяжести груза, находящегося в кисти.

Примером рычага первого рода может быть голова, рассматриваемая в переднезаднем направлении (Рис. 16). Ось вращения рычага проходит через сочленения черепа с первым позвонком. Спереди от точки опоры на относительно коротком плече действует сила тяжести

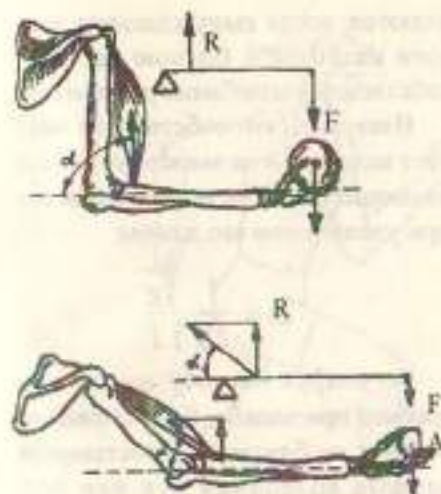


Рис. 15.

головы, позади на относительно длинном плече действует сила тяги мышц, которые прикреплены к затылочной кости. Сумма моментов сил, действующих по часовой стрелки, равняется сумме моментов сил действующих против часовой стрелки, следовательно, череп будет находиться в равновесии, пока выполняется правило моментов сил.

В качестве рычага силы можно рассмотреть действие свода стопы при подъеме на полу пальцы.

Опорой рычага, через которую проходит ось вращения, служат головки плюсневых костей. Преодолеваемая сила - вес всего тела - приложена к таранной кости. Действующая мышечная сила, осуществляющая подъем тела, передается

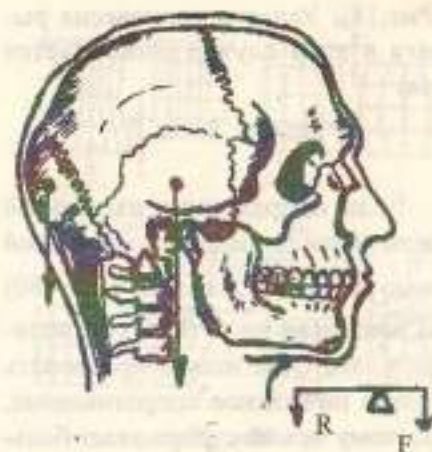


Рис. 16

через ахиллово сухожилие и приложена к выступу пяточной кости.

В опорно-двигательном аппарате мышечная сила может действовать под углом α - к оси рычага. Так же под некоторым углом β - к оси рычага может действовать и сила преодолеваемого сопротивления

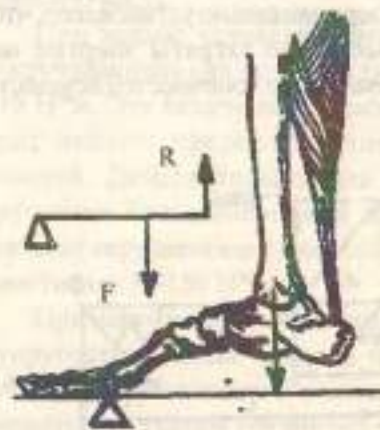


Рис. 17

(Рис.18). Условия равновесия рычага в этом случае записывается так:

$$Fr \sin \alpha = Rl \sin \beta$$

Если направление мышечной силы почти совпадает с продольной осью рычага (β , близко к 0 или 180) то, несмотря на ее большую величину, эта сила может преодолеть только ничтожное сопротивление. Поэтому человек удерживает большой груз при согнутом предплечье и значительно меньший при разогнутом.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ОПОРНО - ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА. Конечности человека могут совершать колебательные движения. Колебания обеспечиваются за счет вынуждающей силы, которая поступает в систему с вынуждающей частотой. Кроме того, конечности имеют собственную частоту колебаний. Экспериментально установлено, что наименьшие затраты энергии на перемещение конечностей осуществ-

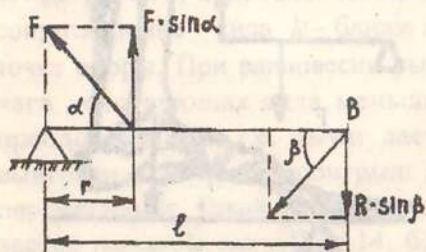


Рис.18

вляются, когда вынуждающая частота на 20-30% больше частоты собственных колебаний рук или ног.

Известно, что собственная частота колебаний не зависит от массы качающегося тела, но уменьшается при увеличении его длины:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Регулируя частоту шагов или гребков при ходьбе, беге, плавании и делая ее близкой к собственной частоте колебаний рук или ног, можно достичь резонанса колебаний и тем самым минимизировать затраты энергии. Об этом факте хорошо знают марафонцы.

Экспериментально доказано, что при наиболее оптимальном сочетании частоты и длины шагов человек демонстрирует существенное повышение физической работоспособности. При резонансной частоте движений осуществляется переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно в потенциальную с минимальными потерями энергии. Это означает, что метаболическая энергия, однажды выделенная в мышечных клетках, используется многократно в последующих циклах движения.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОСТИ И СУСТАВОВ. Механические свойства кости определяются их разнообразными функциями. Кроме двигательной, они выполняют защитную и опорную



Рис. 19

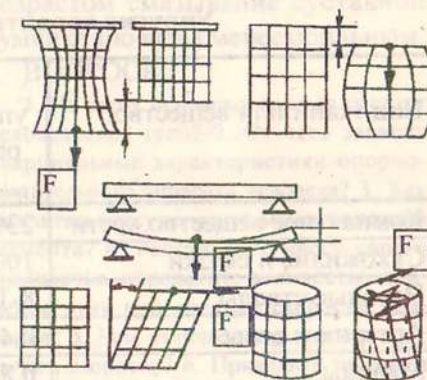


Рис. 20

функции.

Кости черепа, грудной клетки и таза защищают внутренние органы. Опорную функцию выполняют кости конечностей и позвоночника.

Кости рук и ног - это продольные и трубчатые кости. Трубчатое строение костей обеспечивает противодействие значительным нагрузкам, в 2-3 раза снижает их массу и значительно увеличивает момент инерции.

В организме человека выделяют четыре вида механического воздействия на кость: растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

При растягивающей продольной силе кость выдерживает напряжение 150 Н/мм². Это в 30 раз больше, чем давление, разрушающее кирпич. Установлено, что прочность кости на растяжение

выше, чем у дуба, и почти равна прочности чугуна.

При сжатии прочность кости еще выше. Так, самая массивная кость - большеберцовая, выдерживает вес 27 человек. Предельная сила сжатия составляет при этом 16000 - 18000Н.

При изгибе кости человека также выдерживаются значительные нагрузки. Например, силы 12000 Н недостаточно, чтобы сломать бедренную кость.

При ходьбе человека моменты скручивающих сил могут достигать 15 Н*м. Эта величина в несколько раз меньше предела прочности костей. Действительно, для разрушения большеберцовой кости момент скручивающей силы должен достигать 30-150 Н*м.

Примерные величины модуля упругости, а также предела прочности при растяжении и сжатии для некоторых тканей организма приведены в таблице.

Упругие характеристики костной ткани

Вид ткани или вещество.	Модуль упругости на растяжение, кг/мм ²	Предел прочности на растяжение, кг/мм ²	Предел прочности на сжатие, кг/мм ²
Компактное вещество кости	2300	10-12	12-16
Сухожилие и связки	100-150	5-7	-
Нервные стволы	8-12	1,2-1,5	-
Артерии и вены	0,4-0,5	0,2-0,3	-
Мышцы	0,8-1,0	0,05-0,1	-
Сталь	20000	100	135
Дерево	1000	9	5
Каучук	1,2	5	-

Приведенные в таблице данные являются весьма ориентировочные, так как механические свойства тканей, особенно костей, различаются в значительной степени не только у разных людей, но даже у одного и того же человека в зависимости от возраста, состояния здоровья, особенностей образа жизни и питания.

Кость, основа которой содержит неорганические вещества, соли кальция и фосфора, подчиняется закону Гука, и ее механические свойства близки к свойствам неорганических материалов.

Строение отдельных костей приспособлено к нагрузкам. Например, длинные кости конечностей подвергаются в основном изгибу, имеют в средней части трубчатую форму, что обеспечивает наиболее экономичное использование костного вещества, прочность, легкость,

упругость.

Механические свойства суставов зависят от их строения. Суставная поверхность покрыта синовиальной жидкостью, которую хранит суставная сумка. Синовиальная жидкость обеспечивает уменьшение коэффициента трения в суставе примерно в 20 раз. При снижении нагрузки на сустав смазка поглощается губчатыми образованиями, а при увеличении нагрузки выжимается для смазывания поверхности суставов, снижая трение.

Прочность суставов, как и прочность костей, неопредельна. Так, давление в суставном хряще не должно превышать 350 Н/см². При более высоком давлении прекращается смазка суставного хряща и увеличивается опасность его механического стирания. Этот факт необходимо учитывать при проведении туристических походов и

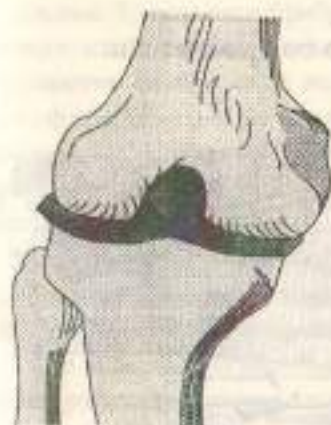


Рис. 21

организации оздоровительных занятий с людьми среднего и пожилого возраста. Известно, что с

возрастом смазывание суставной сумки становится менее обильным.

ВОПРОСЫ:

- Из каких основных звеньев состоит человеческое тело?
- От чего зависят инерциальные характеристики опорно-двигательного аппарата человека?
- Как рассчитать массу сегмента, момент инерции сегмента?
- Рассчитайте массу своего предплечья, определите количество движения руки при средней скорости движения?
- Чем отличается рычаг силы от рычага скорости?
- Приведите примеры рычажных систем в опорно-двигательном аппарате человека.
- Что такое резонансная частота?
- Какие виды деформации реализуются в опорно-двигательном аппарате человека? Охарактеризуйте эти виды деформации.
- Какими свойствами обладает костная ткань?

УПРАЖНЕНИЕ 2.

- Коллагеновое волокно длиной 8 мм и с модулем упругости 10^9 Па, под действием приложенной к нему силы удлинилось на 1 мм. Какое напряжение возникло при этом в волокне?
- Малоберцовая кость свиньи имеет длину 20 см, ее наружный диаметр 35 мм и толщина стенки 3 мм. К кости приложили осевую нагрузку 8 кН. Найти удлинение кости, если модуль упругости равен $4,5 \cdot 10^{10}$ Па.
- Внешний диаметр локтевой кости 15 мм, предел прочности 10^6 Па. Какую силу нужно приложить при осевой нагрузке к кости, чтобы произошел разрыв? Толщина стенки кости 3 мм.
- Бедренная кость собаки имеет длину 25 см и сечение 3 см². Какая работа совершается при сжатии кости на 0,5 мм, если модуль упругости 20 ГПа?
- Фигурист вращается, делая 6 об/с. Как изменится момент инерции фигуриста, если он прижмет руки к груди и при этом частота вращения станет 18 об/с?
- Почему человек, несущий груз на спине, наклоняется вперед?
- Почему трудно стоять на одной ноге?
- Почему при ходьбе люди размахивают руками?
- В каком положении человек устойчивее, когда он сидит или когда стоит? Почему?
- Почему утки и гуси ходят переваливаясь с ноги на ногу?
- Почему вытянутой рукой нельзя удерживать такой же груз, как согнутой?

§ 4. Биодинамика мышечного сокращения.

МЫШЕЧНАЯ ТКАНЬ. Мышцы человека обеспечивают его механическое движение и положение в пространстве. Скелетные мышцы являются основным источником механической энергии человеческого тела. Основным свойством мышц является их способность сокращаться. Эту функцию они выполняют во время движения. Все организмы находятся под влиянием гравитационного поля, поэтому одной из самых важных функций скелетных мышц является поддержание вертикального положения тела в пространстве.

Скелетные мышцы состоят из волокон (клеток) и соединительной ткани. Они присоединяются к костям скелета при помощи сухожилий.

В мышцах волокна расположены, главным образом, параллельно друг другу. Каждое волокно окружено тонкой оболочкой - сарколеммой, а ее внутренность состоит из саркоплазмы, в которой расположены тонкие нити - миофибриллы. Мышечные волокна имеют длину до 10 см и толщину около 50 мкм. Рассмотрим механизм сокращения мышцы, опираясь на ее структуру.

МЕХАНИЗМ СОКРАЩЕНИЯ МЫШЦ. Сократимость - это способность мышцы изменяться при

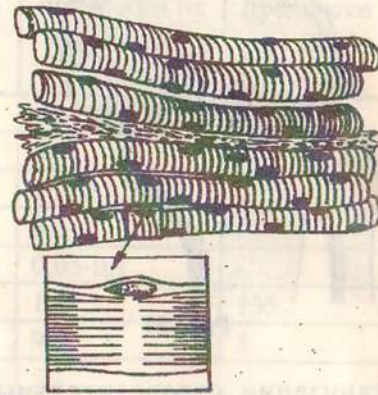


Рис. 22

возбуждению. В результате сокращения происходит укорочение мышцы и возникает сила тяги.

В любом мышечном волокне имеется несколько миофибрилл, которые разделяются на два вида нитей, называемых протофибриллами, они связаны между собой

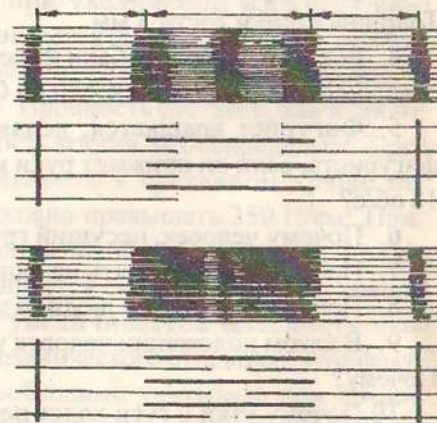


Рис. 23

мостиками. Тонкие протофибриллы состоят из белковых молекул и называются актинами, а толстые протофибриллы - из молекул, называемых миозинами. Волокна образуют сократительный механизм мышцы (Рис.23).

Внутри саркоплазмы находится система тончайших трубок, которые связывают миофибриллы с поверхностью мышечного волокна. Эти трубки работают как насосы кальция, которые поддерживают разность концентрации кальция внутри трубки и в саркоплазме. В спокойном состоянии мышцы, концентрация ионов кальция в саркоплазме во много раз ниже, чем в трубочках. При возбуждении или раздражении мышцы катионы кальция устремляются в саркоплазму, активируют миозин и отщепляют одну молекулу фосфорной кислоты из аденозинтрифосфата (АТФ). В процессе этой химической реакции освобождается энергия, которая приводит в действие механизм сокращения мышцы. В процессе сокращения происходит сдвиг протофибрилл, при котором тонкие нити заходят между толстыми, как это показано на рис.24. Это движение и взаимодействие протофибрилл имеет электростатический характер.

В активизированном состоянии нити актина и миозина сцепляются между собой с помощью актино-миозинового мостика.

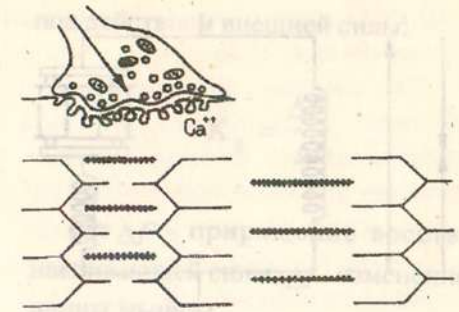


Рис. 24

Возбуждение мышцы происходит с помощью мононейрона, который имеет разветвления и окончания на миофибриллах. Каждая ветвь нервного окончания при раздражении увеличивает концентрации катионов кальция. Кальций обеспечивает протекание биохимической реакции, результатом которой является выделение энергии и сокращение мышцы.

При этом от молекулы АТФ отщепляется фосфорная кислота и выделяется энергия, обеспечивающая электростатическое взаимодействие миозина и актина. Таким образом мышца сокращается.

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЫШЦЫ. Модель представляет собой параллельно и последовательно соединенные элементы деформации (Рис. 25).

В модели выделяют упругие и сократительные компоненты. Упругие компоненты по механическим свойствам аналогичны пружинам. Чтобы их растянуть, нужно при-

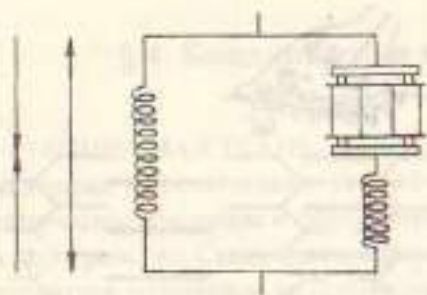


Рис. 25

ложить силу. Работа силы равна энергии упругой деформации.

Модель, состоящая из трех элементов сокращения: параллельного, последовательного и сократительного. Упругие параллельные компоненты составляют оболочки мышечных волокон и их пучков. Последовательные упругие компоненты - это сухожилия, мышцы и те миофибриллы, которые в данный момент не участвуют в сокращении.

Сократительный элемент - это актино-миозинный мостик, что изображается на модели в виде цилиндра, в котором движется поршень. Механизм деформации сократительного элемента был рассмотрен выше.

Данная модель позволяет описать механические свойства мышечной ткани.

СВОЙСТВА МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ. Механические свойства мышечной ткани определяются ее упругими свойствами, к которым относятся: вязкость, жесткость,

прочность, релаксация.

Механическая модель мышцы отражает ее упругие свойства, то есть способность восстанавливать первоначальную длину после деформации. Существование упругих свойств объясняется тем, что при растяжении в мышце возникает энергия упругой деформации. Чем сильнее растяжение мышцы, тем большая энергия запасется в ней.

С увеличением нагрузки на мышцу увеличивается ее длина. Однако эта зависимость не линейная, и наблюдается отклонение от закона Гука. Объясняется это наличием в механической модели мышцы сократительного элемента, который проявляет вязкость при деформации (Рис. 26).

Вязкость мышцы - это запаздывание деформации мышцы при изменении нагрузки.

Другая кривая характеризует упругие свойства активного состояния мышцы. Впервые связь между силой и скоростью мышечного сокращения была установлена

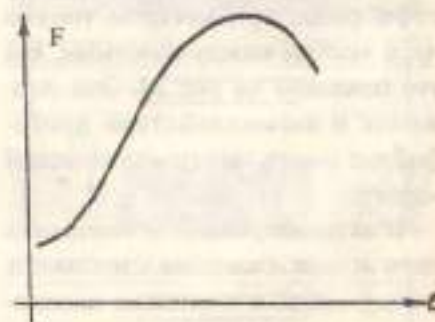


Рис. 26

английским физиологом Хиллом. График этой зависимости представлен на рис. 27.

На кривой Хилла F_0 сила соответствует невозбужденному состоянию мышцы, при котором скорость сокращения мышцы равна нулю. На графике представлены два активных состояния мышцы. В преодолевающем режиме мышца укорачивается в результате сокращения, а в уступающем режиме мышца растягивается внешней силой. Например, икроножная мышца бегуна функционирует в уступающем режиме при взаимодействии ноги с опорой в фазе амортизации, а в преодолевающем режиме - в фазе отталкивания. По характеристическим кривым Хилла можно определить жесткость и прочность мышцы.

Жесткость - это способность противодействовать прикладываемым силам. Коэффициент жесткости определяется как отношение приращения восстанавливающей силы к изменению длины мышцы



Рис. 27

под действием внешней силы:

$$K_g = \frac{\Delta F}{\Delta l}$$

где ΔF - приращение восстанавливающей силы; Δl - изменение длины мышцы.

Величину, обратную жесткости, называют податливостью мышцы. Коэффициент податливости показывает, насколько удлинится мышца при изменении внешней силы на единицу:

$$K_p = \frac{\Delta l}{\Delta F}$$

Например, податливость предплечья взрослого человека близка к 1 (м/Н).

Прочность мышцы оценивается величиной растягивающей силы, при которой происходит разрыв мышцы. Эта сила составляет от 100000 до 300000Н. При нагрузке, превышающей предел прочности, разрушается один из компонентов механической модели.

Для мышц характерно свойство релаксации. Релаксация - свойство мышц, проявляющееся в постепенном уменьшении силы при постоянной длине мышцы. Релаксация проявляется при спрыгивании и прыжке вверх, если во время глубокого подседа человек делает паузу. Чем длительнее пауза,

тем сила отталкивания и высота выпрыгивания меньше.

При сокращении мышцы могут развивать большие усилия. Сила мышцы зависит от ее поперечного сечения и начальной длины волокна. Сила мышцы на единицу площади поперечного сечения называется абсолютной мышечной силой. Для человека она равна от 50 до 100 Н. Сила и мощность одних и тех же мышц зависят от ряда физиологических условий: возраста, пола, питания, тренированности.

При физической тренировке мышечные волокна утолщаются и их энергетические ресурсы увеличиваются, что ведет к увеличению мышечной силы. Мышцы могут переносить большие перегрузки, особенно, если эти перегрузки кратковременны. Максимальную работу мышцы совершают при некоторых средних нагрузках. Наибольшей работоспособностью обладает человек при поднятии и переносе не очень тяжелых и не очень легких грузов.

Большое значение имеет ритм работы. При очень быстрой или при очень медленной работе наступает быстрое утомление мышц, и в результате человек выполняет малое количество работы. Правильная дозировка и ритм работы обеспечивает оптимальное и рациональное использование физического труда.



Рис. 28.

ВОПРОСЫ:

1. Из каких структур состоит мышечное волокно?
2. Дайте характеристику миофибриллам.
3. Почему при сокращении мышцы происходит сдвиг протофибрилл?
4. Объясните механизм возбуждения мышцы.
5. Почему не выполняется закон Гука для мышечной ткани?
6. Объясните механизм действия механической модели мышцы.
7. Что такое уступающий и преодолевающий режим работы мышцы?
8. Охарактеризуйте механические свойства мышечной ткани.



§ 5. Биомеханика ходьбы и бега человека.

КИНЕМАТИКА ХОДЬБЫ И БЕГА. Ходьба и бег - самый древний способ механического передвижения человека по Земле. Известно, что этими способами движения человек проходит за свою жизнь, в среднем, расстояние, равное расстоянию от Земли до Луны.

Механическое передвижение человека осуществляется за счет циклических действий его нижних конечностей. В зависимости от темпа и постановки конечностей выделяют ходьбу и бег.

Как и все циклические движения, перемещение человека характеризуется скоростью передвижения. Скорость передвижения тела есть произведение длины шага на темп движения:

$$v = l \cdot n$$

где v - скорость движения; l - длина шага; n - частота шагов.

Одна и та же скорость может быть достигнута при различных сочетаниях длины и частоты шагов. Кривая, все точки которой соответствуют одной и той же скорости, называется изоспидой. На рис. 29 изображены графики зависимости длины шагов от частоты. Видно, что увеличить скорость можно тремя способами: повысив длину шага, подняв темп и увеличив одновременно длину и частоту шагов.

Для того чтобы понять, как человек ходит или бежит, нужно

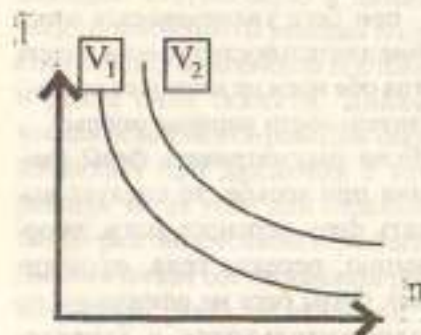


Рис. 29

изучить фазовый состав этих движений. На рис.30 представлены простейшие хронограммы ходьбы, спортивной ходьбы, бега трусцой и спортивного бега.

Анализируя хронограмму, следует отметить:

- при ходьбе сокращается период двойной опоры (когда обе ноги находятся на земле) вплоть до почти

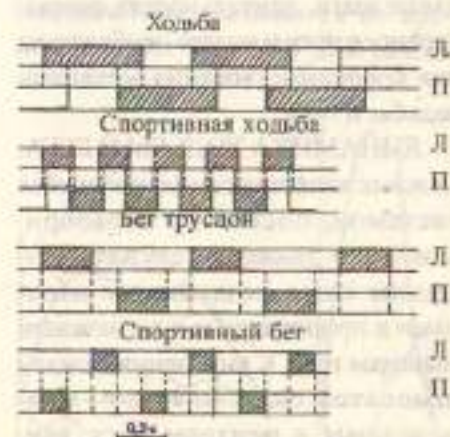


Рис. 30

полного его исчезновения при спортивной ходьбе;

- при беге увеличивается отношение длительности периода полета (когда обе ноги не касаются опоры) к длительности периода опоры.

Если рассматривать фазы движения при ходьбе, то следует выделять фазу переноса ноги, амортизацию, пережат тела, отталкивание. Фазы бега не одинаковы по продолжительности и характеризуются специальной работой мышц.

При беге количество фаз движения сокращается, и можно выделить фазу амортизации, полета и отталкивания. При беге нагрузка ложится на те же мышцы, что и при ходьбе, однако несодинакова последовательность включения и выключения мышц. Кроме того, степень напряжения мышц при беге существенно больше.

Сведения о скорости, темпе, длине шага, длительностях опоры, переносе ноги и полете необходимы для совершенствования механики ходьбы и бега.

ДИНАМИКА ХОДЬБЫ И БЕГА. Человек является самодвижущейся системой, поскольку первопричиной его движений служат внутренние силы, создаваемые мышцами и приложенные к подкожным мышцам тела. К внутренним силам относятся силы инерции, приложенные к центрам масс движущихся звеньев тела. Сила инер-

ции равна произведению массы всего тела или отдельного звена на его ускорение:

$$F_i = m_i \cdot a_i$$

где F_i - сила инерции; m_i - масса звена; a_i - ускорение звена.

Сила инерции направлена в противоположную сторону ускорения, поэтому сила инерции замедляет разгон и торможение тела.

Наряду с внутренними силами на человека действуют внешние силы. При ходьбе к ним относятся: силы тяжести, сила реакции опоры, силы сопротивления воздуха. На рис. 31 представлены силы, действующие при ходьбе и беге.

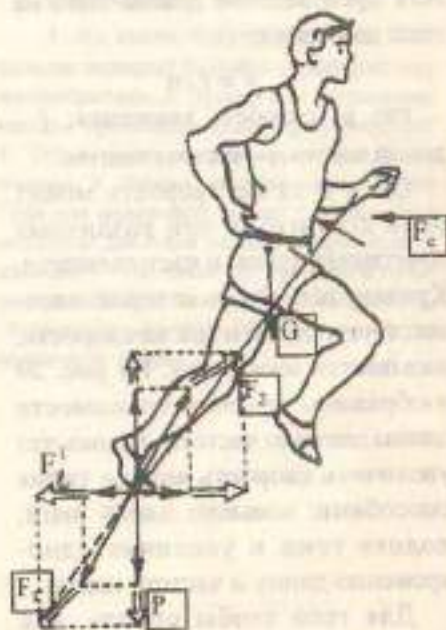


Рис. 31

Где: G - сила тяжести; F_1 - сила инерции; P - вес тела; F_2 - сила сопротивления воздуха; F_3 - сила действующая на опору; F_4 - сила реакции опоры.

Сила, действующая на опору, раскладывается на две составляющие: вертикальную и горизонтальную. Аналогично сила реакции опоры раскладывается на динамическую реакцию опоры и статическую реакцию опоры. При движении сила реакции опоры направлена к центру масс и колеблется около него, создавая опрокидывающий момент (на рисунке показано стрелкой).

Сила тяжести приложена к центру масс и равна произведению массы тела на ускорение:

$$G = mg$$

Сила лобового сопротивления воздуха приложена к центру поверхности тела. Оно увеличивается пропорционально квадрату скорости. Центром поверхности тела называется воображаемая точка, определяющая и характеризующая поверхностные явления тела при его движении.

Сила реакции опоры определяет взаимодействие конечности с поверхностью опоры. Она не является "движущейся" силой, а направлена от точки опоры к центру масс. Силу реакции опоры, как было отмечено,

можно разложить на две составляющие: статическую и динамическую компоненты реакции опоры. Статическая компонента постоянна и равна силе тяжести. Динамическая компонента реакции опоры возникает при движении с ускорением, когда тело или отдельные звенья разгоняются или тормозятся. Динамическая составляющая реакции опоры равна по величине, но противоположна по направлению силе инерции.

В конечном итоге силы действия ног на опору отображают всю совокупность внутренних и внешних сил, действующих на тело человека. Сила реакции опоры равна по величине силе действия на опору, но противоположна по направлению.

Как видно из рис.31, сила действия на опору (как и реакция опоры) имеет две составляющие: вертикальную и горизонтальную. Их значения изменяются во времени, о чем судят по диаграмме

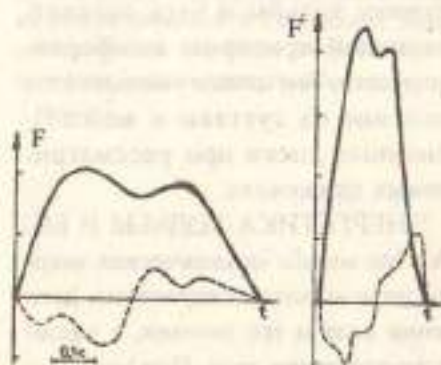


Рис. 32

ходьбы или бега (Рис. 32).

Горизонтальная составляющая диаграммы ходьбы и бега состоят из двух полуовалов: отрицательной и положительной. Отрицательная полуовална соответствует начальной фазе периода опоры, когда происходит неизбежное торможение. При движении ее желательно уменьшать. Тогда вторая положительная полуовална показывает, как изменяется сила во времени. Эта сила продвигает тело человека вперед. Ее величина достигает до 500-600 Н.

Вертикальная составляющая сила при ходьбе сильно отличается по амплитуде от вертикальной составляющей при беге. У мастеров спорта она достигает до 2800 Н, а у новичков - 1300 Н. При ходьбе амплитуда вертикальной составляющей в среднем достигает 1000 Н.

На величину силы действия, на опору влияет свойство дороги и материал, из которого изготовлена обувь. Мягкое покрытие дорожки и обувь с амортизаторами делает технику ходьбы и бега соответствующей критерию комфортабельности. Тем самым уменьшается давление на суставы и межпозвоночные диски при рассматриваемых движениях.

ЭНЕРГЕТИКА ХОДЬБЫ И БЕГА. При ходьбе механическая энергия определяется скоростями движения тела и его звеньев, а также расположением тела. При ходьбе и

беге человек затрачивает энергию не только на горизонтальные и вертикальные, но и на поперечные перемещения общего центра масс.

В зависимости от фазы цикла величина кинетической и потенциальной энергии тела изменяется. Характер этих изменений при ходьбе и беге принципиально различен. Кинетическая и потенциальная энергия при ходьбе изменяется в противофазе; например, в момент постановки ноги на опору, максимум кинетической энергии совпадает с минимумом потенциальной.

При беге - соотношение сифазно, то есть в высшей точке полета максимум кинетической энергии совпадает с максимумом потенциальной. Следовательно, при ходьбе происходит рекуперация энергии, т.е. сохранение энергии путем перехода кинетической энергии в потенциальную энергию гравитации и обратно, а при беге этот вид рекуперации практически отсутствует. Зато при беге значительно более выражен другой вид рекуперации, когда кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию сокращения мышц, действующих подобно пружине.

Энергозатраты на 1 метр пути при ходьбе меньше, чем при беге, но только при низких скоростях передвижения. При высоких скоростях бег, наоборот, экономичнее ходьбы. На рис. 33 представлен



Рис. 33.

график зависимости энергетических затрат от скорости передвижения.

Чем больше скорость, тем значительно возрастают энергозатраты.

Зона, где более выгоден бег, отделена от зоны, где более выгодна ходьба, отделена параметром, его называют граничной скоростью. Граничная скорость определяется числом Фруда (Φ), которая вычисляется по формуле:

$$\Phi = \frac{v^2}{2gh}$$

где g - ускорение свободного падения; v - скорость передвижения человека; h - высота общего центра масс, тела в основной стойке.

Если число Фруда меньше единицы ($\Phi < 1$), то выгоднее ходьба, а при $\Phi > 1$ - выгоднее бег. Граничную скорость можно определить

при условии, если $\Phi = 1$, тогда:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Энергетические затраты зависят от многих факторов, в том числе от сочетания длины и частоты шагов. При слишком коротких или чересчур длинных шагах энергозатраты на 1 м пути выше, чем при оптимальном сочетании.

Например, отклонение длины шага от оптимальной величины на 6% при беге со скоростью 4 м/с увеличивает энергетические затраты, приходящиеся на метр пути в среднем на 1 Дж.

ВОПРОСЫ:

1. Каковы различия в кинематике ходьбы и бега?
2. Как можно отличить ходьбу от бега?
3. Какие внешние силы действуют на человека во время ходьбы и бега?
4. Какие силы препятствуют движению тела при ходьбе и беге?
5. Каков характер изменения кинетической и потенциальной энергии при ходьбе и беге?
6. Для каких целей определяют граничную скорость?
7. По графику зависимости энергозатрат и скорости определите энергию, которую затрачивает организм на участок пути 1 м при оптимальном режиме механического движения.
8. Определите, какое движение для вас будет энергетически выгоднее, если вы двигаетесь со скоростью 7 км/час?

§ 6. Биодинамика плавания живых организмов.

ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПЛАВАНИИ ЧЕЛОВЕКА. Плавание - это циклическое движение живого существа в жидкой среде, реализующееся при отталкивании существа об эту среду. Плавать могут многие животные, в том числе и человек.

Наши современники демонстрируют незаурядные способности в плавании. Но, к сожалению, очень многие не умеют плавать и боятся воды. Последнее объясняется, прежде всего, непониманием того факта, что по законам физики здоровый человек в теплой и спокойной воде утонуть не может.

На тело, находящееся в жидкости, действуют сила тяжести и выталкивающая сила. Если плотность жидкости больше плотности тела, то тело плавает на поверхности жидкости. Если плотность тела и жидкости равны, то тело находится в равновесном состоянии. Если плотность тела больше плотности жидкости, то тело тонет.

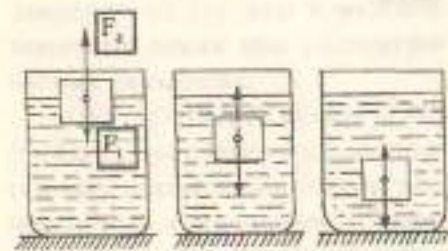


Рис.34



Рис.35

Поскольку человеческое тело на 60% состоит из воды, а в легких находится несколько литров воздуха, то сила тяжести уравновешивается выталкивающей силой. Чтобы проверить это, проделайте простой опыт: стоя по грудь в воде наберите в легкие как можно больше воздуха и лягте на воду. При этом ваше тело будет плавать на поверхности воды. Если начать постепенно выпускать воздух из легких, тело будет погружаться в воду. Проявив большую силу воли, можно продолжить выдох до тех пор, пока тело не опустится на дно водоема. Следовательно, изменение объема воздуха в легких человека можно регулировать величину выталкивающей силы и тем самым плавучесть тела.

Сказанное подтверждается следующими цифрами: плотность тела при вдохе у пловца-мужчины в среднем равна 960 кг/м^3 , а у женщины - 980 кг/м^3 , что объясняется большим объемом жировой ткани в теле

женщин. На выдохе плотность тела больше у мужчин 1060 кг/м^3 и у женщин 1040 кг/м^3 . Напомним, что плотность воды составляет 1000 кг/м^3 и что погруженное в воду тело может утонуть в том случае, если его плотность больше плотности воды.

Мы рассмотрели случай неподвижного тела в воде. А что будет, если тело движется относительно воды? Оказывается, если тело животного плывет, его плавучесть выше, чем у неподвижного. Когда тело уплощенной формы движется в водной или газовой среде, так что передний его конец расположен несколько выше заднего возникает подъемная сила (Рис.36). Механизм ее возникновения будет рассмотрен в следующем параграфе.

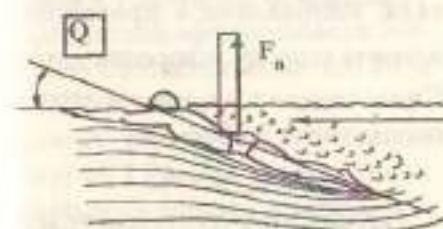


Рис.36

ДИНАМИКА ПЛАВАНИЯ. В воде тело человека находится под действием нескольких сил, которые, суммируясь, обеспечивают его движение вперед при плавании. Рассмотрим это явление подробнее.

Условно силы можно подразделить на вертикально и горизон-

тально направленные. Вертикально-направленные силы: сила тяжести, выталкивающая сила и подъемная сила. Сила тяжести направлена вертикально вниз, приложена к центру масс и определяется массой тела:

$$G = mg$$

где m - масса тела, g - ускорение свободного падения.

Выталкивающая сила, или сила Архимеда, направлена вертикально вверх, приложена к центру объема тела пловца. Центр объема, как правило, не совпадает с центром масс. Поэтому возникает вращающий момент ног человека, неподвижно лежащего в воде, ноги которого опускаются. Выталкивающая сила определяется по формуле:

$$F_z = V \rho_b g$$

где V - объем тела, ρ_b - плотность воды.

Подъемная сила возникает при отталкивании тела потоком воды. Она пропорциональна площади горизонтального сечения тела и скорости набегающего потока и зависит от угла атаки.

Горизонтально-направленные силы: продвигающая сила, сила лобового сопротивления, сила сопротивления вихреобразования, сила трения о воду, сила сопротивления волнообразования, сила инерции.

Продвигающая сила (или сила тяги) возникает в результате дей-

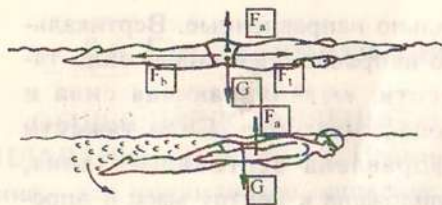


Рис.37

ствий рук и ног и определяется через работу пловца.

Сила лобового сопротивления возникает при движении тела в водной среде. Она зависит от формы тела, скорости его движения, площади поперечного сечения пловца:

$$F_b = \rho_b S c v^2$$

где ρ_b - плотность воды, S - площадь поперечного сечения пловца (площадь миделя тела), c - безразмерный коэффициент сопротивления, зависит от формы тела, v - скорость движения тела.

Коэффициент сопротивления лежит в пределах (для человека) от 0,58 до 1,04. Минимальная величина коэффициента сопротивления воды для капли равна 0,5.

Сила сопротивления вихреобразования возникает в тех местах, где струи воды отрываются от поверхности тела. При этом образуются завихрения и по закону Бернулли давление понижается. Из-за разности давлений возникает сила, которая как бы отсасывает тело назад. Сила сопротивления вихреобразования зависит от формы и

характера поверхности тела. Незначительное изменение положения тела может ухудшить его обтекаемость. Так опускание головы пловца вниз увеличивает сопротивление на 12%, а отклонение ее от оптимального положения вверх - 10-20%.

Сила трения о воду характеризует взаимодействие воды с телом человека. Устья пор, складки кожи, волоски на коже, рыхлый или ворсистый костюм пловца способствует усилению сопротивления.

Сила сопротивления волнообразования возникает на границе водной и воздушной среды, и она также направлена против движения пловца.

Сила инерции обусловлена инерционными свойствами плавучего тела, направлена в противоположную сторону ускорения тела. Сила зависит от массы тела и определяется по формуле:

$$F_i = -ma$$

Оптимальное соотношение всех горизонтально - и вертикально - составляющих сил обеспечивает минимальные затраты энергии, которую расходует пловец.

ЭНЕРГЕТИКА ПЛАВАНИЯ. Силы, от которых зависит сопротивление воды, являются основными из тех, что приходится преодолевать пловцу. Поскольку плотность воды в 800 раз больше плотности воздуха, плавание требует

больших затрат энергии и является наименьшим экономичным видом локомотаций человека. Коэффициент механической эффективности, определенной так:

$$\eta = \frac{A_1}{A_2} 100\%$$

где A_1 - полезная работа, A_2 - полная работа.

Коэффициент механической эффективности характеризует эффективность движения, так для пловца коэффициент равен 1-5% и увеличивается по мере повышения квалификации пловца. Этот показатель намного ниже, чем у наземных локомотаций человека (20-40), и ниже, чем у рыб и морских животных. Так, у зеленой черепахи, форели и у дельфина коэффициент механической эффективности составляет соответственно 10, 14 и 40%. При плавании в ластах коэффициент выше, чем без ласт, и достигает 17%. Эти факты говорят о неиспользованных резервах техники передвижения человека в водной среде.

Энергетическая стоимость метра пути у пловцов международного класса примерно на 40% ниже по сравнению с пловцами невысокой квалификации.

Поддерживать высокую силу тяги на всей дистанции человек может только в том случае, если до самого финала сохранит достаточно энергии. Поэтому важно исключить

непроизвольные затраты энергии. Для этого необходимо устранить лишние движения, выбрать наиболее эффективный темп движения, снизить величины тормозящих сил, устранить непроизводительные мышечные напряжения.

Из тормозящих сил наиболее велика сила лобового сопротивления воды и сила сопротивления вихреобразования. Обе они снижаются с уменьшением угла атаки. Угол атаки - угол между продольной осью тела и направлением движения. Чем меньше угол атаки, тем меньше модель тела, поверхность отрыва струи.

Таким образом, пловец должен выбирать положение тела по возможности горизонтальное и вытянутое в направлении передвижения. Для снижения непроизводительных затрат энергии следует уменьшать внутрицикловые колебания скорости, уменьшить силы инерции. Это достигается непрерывной работой ног и тем, что одна рука начинает гребок захватом в тот момент, когда другая рука еще не завершила отталкивание.

ОСОБЕННОСТИ ПЛАВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ. Плавание живых существ подчиняются законам физики. Однако характер плавания, способы движения, средства, обеспечивающие плавательные движения, у различных живых организмов отличаются. Это связано с

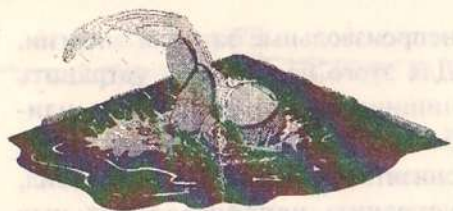


Рис.38

особенностями их физиологического строения, средой обитания, особенностями жизнедеятельности.

Легко заметить, что в процессе движения рыбы и пиявки отталкивают воду назад, а сами движутся вперед. Плывущая пиявка отгоняет воду назад волнообразными движениями тела, а плывущая рыба - взмахами хвоста. В зависимости от участия обширных участков тела рыбы в создании движущей силы можно выделить три типа плава-

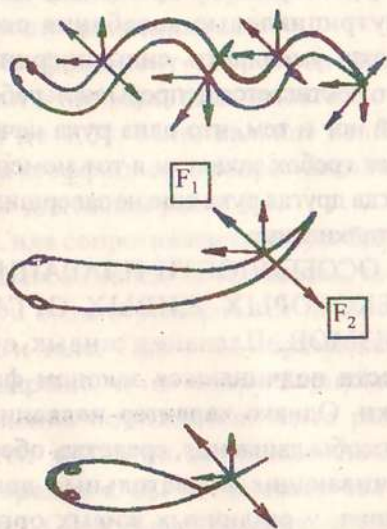


Рис.39

тельных движений: угревидное, ставридовидное и при помощи хвостового плавника. Так плавают угри, ставридовидные и кузовковые рыбы.

Таким образом, движение рыб и пиявок служит иллюстрацией реализации третьего закона Ньютона при плавании.

Некоторые животные плавают используя принцип реактивного движения, например, кальмары, осьминоги, каракатицы.

Морской моллюск - гребешок, резко снижая створки раковины, рывками может двигаться вперед за счет реактивной струи воды, выбрасываемой из раковины.

Чтобы увеличить скорость движения, иначе говоря, число реактивных импульсов в единицу времени, необходима повышенная проходимость нервов, которая возбуждает сокращение мышц, обслуживающих "реактивный двигатель". Такая большая проводимость возможна при большом диаметре нерва. Известно, что у кальмаров самые крупные в живом мире нервные волокна. Они достигают в диаметре 1 мм, что в 50 раз больше, чем у большинства млекопитающих, проводят возбуждение со скоростью 25 м/с. Этим и объясняется большая скорость кальмара (до 70 км/ч). Кроме того, быстрота и маневренность кальмара объясняется прекрасными гидродинамическими формами тела.



Рис. 40

Плотность живых организмов, населяющих водную среду, очень мало отличается от плотности воды, поэтому их вес почти полностью уравновешивается архимедовой силой. Благодаря этому водные животные не нуждаются в столь массивных скелетах, как наземные.

Интересна роль плавательного пузыря у рыб. Это единственная

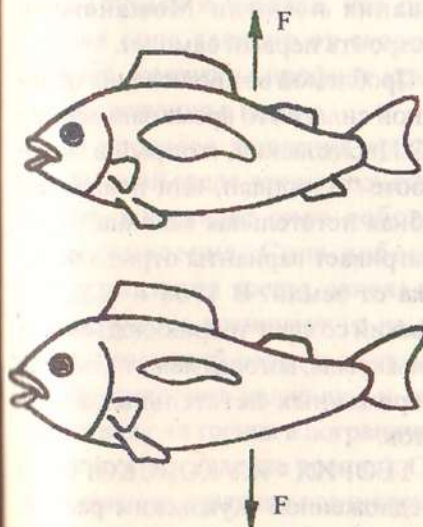


Рис.41

часть тела у рыбы, обладающая заметной сжимаемостью. Сжимая пузырь усилиями грудных и брюшных мышц, рыба меняет объем своего тела и тем самым среднюю плотность. Благодаря чему она может в определенных пределах регулировать глубину своего погружения.

Важным фактором в жизни водоплавающих птиц является наличие толстого, не пропускающего воды слоя перьев и пуха. В пухе содержится значительное количество воздуха. Благодаря этому своеобразному воздушному пузырю, окружающему все тело птицы, ее средняя плотность оказывается очень малой. Этим объясняется тот факт, что утки и другие водоплавающие мало погружаются в воду при плавании.

ВОПРОСЫ:

1. Почему человеку, находящемуся в воде, очень трудно утонуть?
2. Объясните, почему плавучесть тела увеличивается при его горизонтальном движении?
3. Какие силы действуют на человека во время его горизонтального движения?
4. Объясните, почему сила сопротивления, обусловленная вихреобразованием препятствует движению тела в воде? Как ее уменьшить?
5. Какие условия необходимо реализовать, чтобы потери энергии при плавании человека были минимальны?
6. Какие физические законы реализуются при плавании живых существ в жидкой среде?

§ 7. Основы полета живых существ.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЗДУХОПЛАВАНИЯ. Причина возникновения состояния полета связана с фактом наличия подъемной силы. Загадка полета занимала умы ученых задолго до появления самолетов. Первая попытка исследования природы подъемной силы была сделана итальянским художником и ученым Леонардо да Винчи в 1505 г. Объясняя причину возникновения подъемной силы птицы, он считал, что из-за быстрых ударов крыльями воздух под ними уплотняется и поддерживает птицу. Эта гипотеза Леонардо да Винчи, основанная на сжимаемости воздуха, была ошибочной, так как использовалась применительно к скорости полета с малыми скоростями, когда свойство сжимаемости воздуха практически не проявляется.

В 1852 г. Магнус экспериментально показал, что поперечная

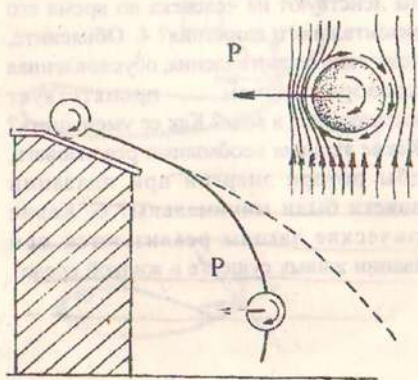


Рис.42

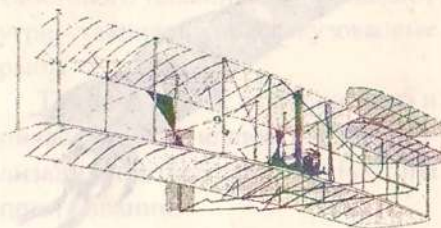


Рис.43

сила, вызывающая отклонение снаряда при горизонтальном полете, возникает из-за взаимодействия двух потоков воздуха: набегающего на снаряд и вращающегося вместе со снарядом. Это явление получило название эффект Магнуса.

В 70-х годах прошлого века к проблеме подъемной силы обращается А.Ф. Можайский. Он анализирует и исследует планирующий и парящий полет птиц. Эти исследования помогли Можайскому построить первый самолет.

Проблемой возникновения подъемной силы в это время занимается К.Э. Циолковский, который в своей работе "Аэроплан, или птица подобная летательная машина", рассматривает варианты отрыва человека от земли. В 1906 г. Н.Е. Жуковский создает теорию подъемной силы крыла, которая лежит в основе современных летательных аппаратов.

ТЕОРИЯ ЖУКОВСКОГО. В предложенной Жуковским расчетной схеме крыло рассматривалось

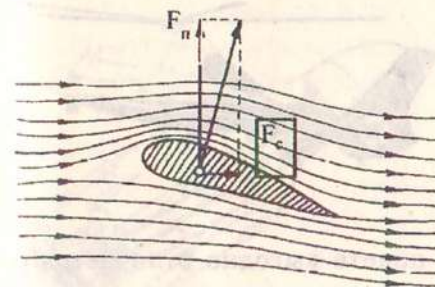


Рис.44

как тело, вокруг которого образуются вихри усиливающие и замедляющие скорости потока воздуха. Над крылом скорость частично увеличивается, под крылом - уменьшается.

В соответствии с законом Бернулли это приводит к появлению разности давлений под и над крылом, т.е. к созданию подъемной силы. Жуковский вывел теоретическую формулу для подъемной силы крыла и показал, что подъемная сила зависит от скорости потока, кривизны профиля крыла, его положения в потоке.

В процессе движения крыла в воздушной среде, кроме подъемной силы, возникает сила лобового сопротивления. Сила лобового сопротивления всегда направлена по потоку и возникает из-за разности давлений перед и за крылом (сопротивление давления) и из-за действия сил трения в пограничном слое (сопротивление трения). Сопротивление давления возникает из-за разности давлений перед и за

крылом. Сопротивление трения происходит из-за проявления вязкости воздуха в пограничном слое.

Теория Жуковского является итогом долгих и серьезных теоретических и экспериментальных исследований. Она позволяет описать не только аэродинамику полета современных летательных аппаратов, но и объяснить полет многих живых существ.

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ. В теории воздухоплавания известны три основных принципа создания подъемной силы: аэростатический, аэродинамический и реактивный.

Аэростатический принцип создания подъемной силы основан на законе Архимеда. Аэростат представляет собой оболочку, наполненную газом легче воздуха. Перемещение аэростата зависит от соотношения его веса и подъемной силы. При $F_b > G$ - аэростат поднимается $F_b = G$ - на постоянной высоте; $F_b < G$ - снижается.

Аэродинамический принцип создает подъемную силу при пере-

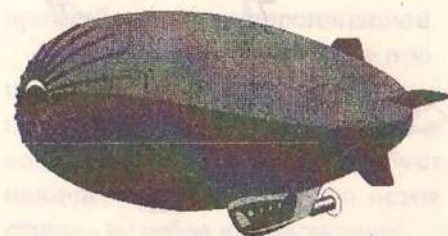


Рис.45

мещении тела относительно воздуха. Подъемная сила самолета создается неподвижно закрепленным крылом. При поступательном движении самолета крыло обтекается потоком воздуха. Из-за особой формы сечения крыла создается разность давлений под и над крылом и возникает подъемная сила.

Перемещение самолета в воздухе происходит под действием силы тяги, создаваемой силовой установкой. Планер, в отличие от самолета, не имеет силовой установки и планирует за счет воздушных потоков. Таким способом летают ласточки.

Подъемная сила вертолета создается несущим винтом, который вращается за счет двигателя. При вращении несущий винт с некоторой силой отбрасывает воздух вниз, который с такой же силой действует на винт, поднимает вертолет.

У аппаратов с машущими крыльями подъемная сила возникает в результате маховых движений крыла. Крыло птицы при машущем



Рис. 46



Рис. 47

полете выгодно отличается от жесткого крыла самолета, так как оно очень подвижно и маневренно. Вследствие этого, силы, действующие на него, рассчитать очень сложно.

Но полет большинства птиц и насекомых можно сравнить с полетом самолета и вертолета. Полет маленькой птички колибри напоминает полет вертолета. Полет насекомых вида «хальциды» наводит на мысль улучшения конструкции вертолетов. Дело в том, что крылья насекомых взаимодействуют таким образом, что одно крыло обеспечивает разгонный вихрь для другого, что улучшает аэродинамические свойства полета.

Реактивный принцип создания подъемной силы основан на третьем законе Ньютона и законе сохранения количества движения. Для того, чтобы возникла подъемная сила, направленная в сторону, противоположную весу ракеты, необходимо, чтобы сила тяги была направлена под некоторым углом к горизонту, при этом ее вертикальная составляющая и будет являться подъемной силой ракеты.

Принцип реактивного подъема

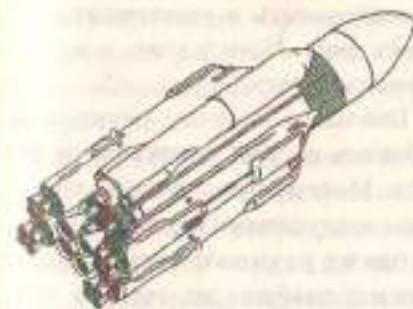


Рис. 48

используют насекомые. Так, если наблюдать за бабочкой, то можно заметить, что в каждом цикле взмаха крыльями у бабочки много времени приходится на момент, когда ее крылья сомкнуты.

Между тем, насекомое не только не теряет высоту, но даже еще и поднимается. Факт объясняется тем, что при каждом взмахе между крыльями в верхнем и нижнем положении образуются соплообразные тоннели, которые изме-

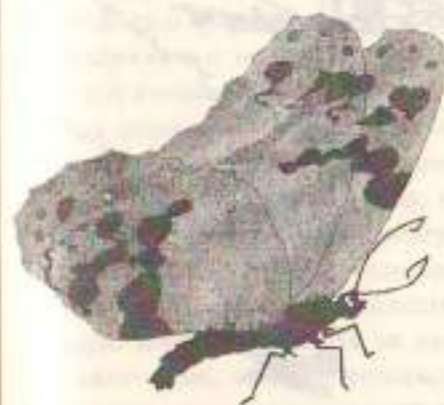


Рис. 49

няются в процессе взмаха. Из тоннелей выдавливается воздух, который создает реактивную силу тяги.

ФАКТОРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОЛЕТ ПТИЦ. Наличие перьев и значительное изменение скелета привело к развитию у большинства птиц структурных приспособлений, которые позволили им летать и в значительной степени овладеть воздушной стихией.

Перо птицы - конструкторское чудо природы. Именно оно сделало птиц самыми совершенными летунами в царстве природы. Выделяют четыре вида перьев: стержневые, контурные, пуховые и нитевидные. Перу одновременно присущи и легкость, и прочность. На рис.50 представлено контурное перо голубя под микроскопом. Оно состоит из центрального стержня, от которого в обе стороны под углом 45 градусов отходят параллельные бороздки, которые имеют свои ответвления. Ответвления с помощью маленьких крючков и бороздок сцепляются друг с другом, и, благодаря этому, крыло сохраняет легкость, а его поверхность становится плотной, прочной и воздухонепроницаемой.

Развитие скелета птиц в процессе эволюции шло по линии приспособления их к жизни в воздухе. Так как полет требует наличие жесткой рамы, то остов птицы - ее ребра и позвоночник-

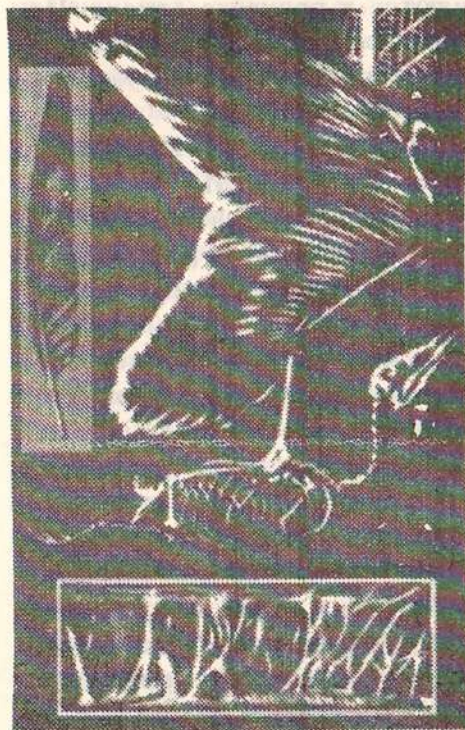


Рис. 50

утратили гибкость, а многие кости срослись между собой. Плечевой пояс птицы хорошо развит и служит прочной опорой для крыльев. Широкая грудина с развитым килем обеспечивает большую поверхность для прикрепления мощных грудных мышц. Летательная мускулатура у таких птиц, как голубь, составляет половину веса всей птицы.

Форма тела птицы обтекаемая, поэтому при полете птица встречает небольшое сопротивление воздуха. При этом следует заметить, что у птицы компактный череп и обычно обтекаемый, заостренный клюв.

Хвост короткий, что увеличивает маневренность и уменьшает сопротивление. Ноги у птиц в полете прижаты к телу.

Благодаря наличию нескольких губчатых костей, уменьшается вес тела. Многие полости тела заполнены воздушными мешками. Мешки также улучшают вентиляцию легких, снабжая их свежим воздухом при вдохе и выдохе.

Птицы обладают высокой температурой тела и хорошей теплоизоляцией, которая препятствует охлаждению тела воздухом во время полета. Кроме того, высокая температура повышает эффективность сокращения мышц. У птицы большое, сильное сердце, способное поддерживать высокое кровяное давление. Птицы обладают большой остротой зрения. У них имеется третья вековая перепонка, которая удаляет инородные частицы, попадающие в глаза во



Рис.52

время полета. Всем летающим птицам свойственна поразительная координация работы мышц. Это также оптимизирует затраты энергии при полете.

ПОЛЕТ ПТИЦ. При полете птицы на нее действует подъемная сила и сила лобового сопротивления. Различают три основных типа полета: машущий, парящий и зависающий.

У таких птиц, как голубь, у которого крылья делают около двух взмахов в секунду, основная мощность развивается при опускании крыла. Это происходит благодаря сокращению сильно развитых больших грудных мышц. При взмахе крыла маховые перья плотно смыкаются, отбрасывают воздух, создают избыточное давление и обеспечивают максимальную подъемную силу. Наклон крыла птицы обеспечивает ее продвижение вперед.

Разные птицы летают с различными скоростями. Эти различия обусловлены формой крыла и ее изменениями в полете, а также частотой взмахов.

При парящем полете крылья неподвижно распластаны под углом 90 градусов относительно тела, и птица постепенно теряет высоту. Когда птица, планируя, опускается, на нее действует сила тяжести, которую можно разложить на две составляющие, одна из которых направлена вперед по линии полета,



Рис.52

а другая - вниз под прямым углом к первой.

С увеличением скорости планирования эту вторую силу уравновешивает возрастающая подъемная сила, а тягу уравновешивает лобовое сопротивление, в результате чего птица планирует с постоянной скоростью.

Птицы, имеющие легкое тело и широкие крылья, используют при планировании восходящие термальные потоки воздуха. Так, орлы могут постепенно набирать высоту, делая небольшие круги. Быстро парят морские птицы, например, альбатросы, при этом они используют сильные порывы ветра.

Планирующий полет довольно часто наблюдается у растений. Многие плоды и семена снабжены либо пучками волос (одуванчик, хлопчатник), действующими наподобие парашюта, либо поддерживающими плоскостями (клен, береза, зонтиковые). Планирующий полет совершают белки-летяги и летучие мыши. Белки пользуются своими перепонками для того, чтобы увеличить подъемную силу при совершении больших прыжков.



Рис. 53

Зависающий полет, когда птица машет крыльями, но при этом остается на одном месте. При этом крылья совершают около 50 взмахов в секунду, создавая силу тяги, направленную вверх, которая урав-



Рис. 54

новешивает вес тела.

Птицы, способные зависать, имеют очень сильно развитые летательные мышцы. Их крылья могут наклоняться почти под любым углом. Примером такого типа полета может быть жаворонок и другие луговые птицы.

ВОПРОСЫ.

1. Что из себя представлял летательный аппарат Леонардо да Винчи? 2. Почему принято считать, что эффект Магнуса положил начало развития теории подъемной силы крыла? 3. От каких факторов зависит лобовое сопротивление крыла? Предложите способы увеличения подъемной силы крыла. 4. На каком законе основан аэродинамический принцип создания подъемной силы? 5. В чем преимущество аэродинамического принципа полета над другими принципами? 6. Объясните, как бабочка использует реактивный принцип полета? 7. Перечислите основные факторы обеспечивающие полет птиц. 8. Постройте схемы действия сил на птицу при машущем, парящем и зависающем полете. 9. Опишите и объясните полет обыкновенного воробья используя знания данного параграфа.

УПРАЖНЕНИЕ 3.

1. Почему высоко в горах у людей легко происходят вывихи суставов?
2. Почему в конце прыжка спортсмены опускаются на согнутые ноги?
3. Почему рыбы имеют более слабый скелет, чем животные, обитающие на суше?
4. Объясните работу руки и стопы человека, применяя правило рычага?
5. Рассчитайте работу, совершаемую штангистом, поднявшим штангу массой 217,5 кг на уровень груди 1,8 м, а затем зафиксировавшим вес на высоте 2,3 м. Какую мощность он при этом развивает, если упражнение выполняется в течение 2,5 с?
6. Голубь, имеющий массу 0,3 кг, набирает высоту в течение 20 с. Какую мощность он при этом развивает?
7. Известно, что летучая рыба взлетает на высоту до 10 м и совершает по инерции полет протяженностью до 30 м., при длительности полета 2 с. Рассчитайте, каковы будут горизонтальная и вертикальные составляющие скорости рыбы, время подъема и падения в воздухе.
8. Масса летательной рыбы 0,5 кг, вычислите кинетическую энергию в момент отрыва рыбы от воды и в верхней точке траектории.
9. Какую скорость приобретает кальмар после одного сокращения мантийной полости, если выбрасываемая из нее со скоростью 7,5 м/с вода составляет 1/3 массы тела кальмара?

САМОЕ ВАЖНОЕ В БИОМЕХАНИКЕ.

Мы рассмотрели основы биомеханики - науки, изучающей двигательные возможности и двигательную деятельность живых существ. Какие выводы можно сделать?

1. Движение любого биообъекта можно описать, воспользовавшись биомеханическими характеристиками: кинематическими, динамическими, энергетическими. Живые организмы описывают сложные движения, однако, используя законы механики, можно любое движение разложить на составляющие и охарактеризовать его.

2. Одним из самых совершенных систем, реализующих механическое движение, является опорно-двигательный аппарат человека и животных. При движении и функционировании в опорно-двигательном аппарате реализуются следующие законы физики: закон сохранения и изменения энергии, закон сохранения и изменения поступательного и вращательного движения, закон сохранения массы тела, закон Гука, правило моментов сил. Движение опорно-двигательной системы человека можно описать, сделать расчет движений сегментов тела, определить их массу.

3. Биологическая ткань является уникальным творением эволюции. Она связывает в единое целое живой организм, обеспечивает функционирование его систем. Важной функцией мышечной ткани является ее сократимость. Физиологический механизм сокращения мышц имеет электростатический характер.

4. Биомеханика рассматривает и описывает движения живых организмов в различных средах. При движении живых организмов по суше, в воде и воздухе на них влияют те же факторы окружающей среды, проявляются те же законы физики, что и на любое тело. Однако вследствие изменения формы тела, особенностей его строения, качественных характеристик биологических объектов живые организмы проявляют большее многообразие форм и видов движения.

ГЕМОДИНАМИКА

Кровообращение - это один из наиболее важных процессов, происходящих в живом организме. Для понимания многих физиологических явлений необходимо знать связь между давлением и скоростью движения крови, а также зависимость этих величин от свойств крови, особенностей кровеносных сосудов и работы сердца.

Кровь - это не идеальная жидкость, поэтому применять законы "гидродинамики" нужно с учетом того, что свойства крови отличаются от свойств идеальной жидкости. Необходимо учитывать, что упругие стенки кровеносной системы и их многократное ветвление отличаются от системы водопроводных труб, сердце также нельзя уподоблять простому насосу. Поэтому кровеносная система живого организма рассматривается как модель кровообращения. Раздел биофизики, описывающий движение крови в сердечно-сосудистой системе, используя законы гидродинамики, называют гемодинамикой.

§ 8. Физические основы гемодинамики.

УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ ПОТОКА. В основе гемодинамики лежит теория движения жидкости по замкнутой системе. Гидродинамика - раздел механики, изучающий движение жидкости и явления, происходящие при движении в жидкостях твердых тел. Жидкость в физике рассматривается как жидкость, не сжимаемая и не обладающая вязкостью, такую жидкость называют идеальной.

Для непрерывного потока жидкости справедливо уравнение неразрывности потока.

В неразрывном потоке трубы переменного сечения объемный расход жидкости есть величина постоянная:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

где S_1 и S_2 - сечение трубы; v_1 и v_2 - скорости жидкости в этих сечениях.

Объемный расход жидкости есть произведение площади сечения на скорость течения жидкости:

$$Q = S \cdot v$$

где Q - расход жидкости.

При разветвлениях потока суммарный расход во всех развет-

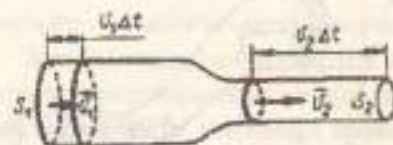


Рис.55

влениях остается постоянным. Так расход крови, протекающей через аорту, равен суммарному расходу крови в капиллярах.

УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ. Движение жидкости обусловлено наличием статического, динамического и весового давления.

Статическое давление возникает при действии внешней силы на жидкость.

Давление покоящейся жидкости, создаваемое ее собственным весом на глубине, называется весовым давлением, оно определяется по формуле:

$$P = P_0 + \rho gh$$

где P_0 - атмосферное давление, ρ - плотность жидкости, h - высота столба.

В движущейся жидкости возникает дополнительное давление, обусловленное кинетической энергией потока - это динамическое давление.

Пусть труба переменного сечения изогнута так, что оси двух каких-либо участков находятся на высоте h от выбранного гори-

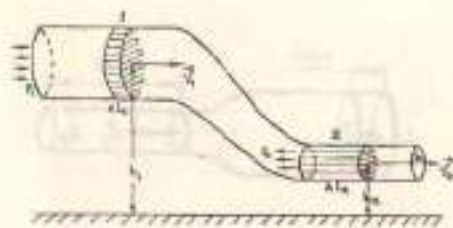


Рис.56

зонтального уровня. (Рис 56). Жидкость поступает в участок трубки 1 под статическим давлением P_1 со скоростью v_1 , в участок 2 со скоростью жидкости v_2 , статического давления P_2 в этом участке препятствует ее движению и направлено в сторону, противоположную направлению давления.

Можно доказать, опираясь на закон сохранения энергии, что для потока жидкости справедливо соотношение:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2$$

Это есть закон Бернулли: полное давление жидкости равно сумме статического, динамического и весового давлений в любой части потока, остается постоянным.

Если жидкость не идеальная и существует вязкость, то энергия изменяется и совершается работа по преодолению сил внутреннего трения:

$$A = V \left[(P_1 - P_2) + \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) + \rho g \Delta h \right]$$

где V - объем жидкости. Данная формула используется при расчете работы сердца.

ТЕЧЕНИЕ РЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ. При течении реальной жидкости между ее слоями возникает внутреннее трение. Силы внутреннего трения определяются помощью уравнения Ньютона:

$$F_t = \lambda \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta S$$

где F_t - сила внутреннего трения; λ - коэффициент трения; $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ - градиент скорости, ΔS - площадь поверхности слоев.

Течение жидкости может быть ламинарным и турбулентным. Скорость, при которой ламинарное течение переходит в турбулентное, называется критической скоростью и определяется числом Рейнольдса, которое характеризует режим течения жидкости. Число Рейнольдса - безразмерная величина, численно равная:

$$R_e = \frac{Dv\rho}{\lambda}$$

где D - диаметр трубы; v - скорость жидкости; ρ - плотность жидкости.

Критическое значение числа, при котором ламинарное течение переходит в турбулентное, определяется экспериментально. Так Рейнольдс вычислил, что для воды, текущей в гладкой цилиндрической трубе, $R_e = 2300$, а для идеальной жидкости $R_e \rightarrow \infty$.

Расход реальной жидкости в трубе постоянного радиуса можно рассчитать с помощью закона Гагена - Пуазейля. Объемный расход жидкости в трубе пропорционален

четвертой степени радиуса трубы и градиенту давления и обратно пропорционален коэффициенту вязкости жидкости:

$$Q = - \frac{\pi R^4}{8\lambda} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

где R - радиус трубы; $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ - градиент давления.

Если ввести обозначение:

$$z = \frac{8\lambda \Delta x}{\pi R^4}$$

где z - гидравлическое сопротивление, то закон Гагена - Пуазейля можно записать:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{z}$$

Объемный расход жидкости пропорционален изменению статического давления и обратно пропорционален гидравлическому сопротивлению. Этот закон по форме похож на закон Ома.

Закону Гагена - Пуазейля подчиняется явление фильтрации, заключающееся в переносе жидкости через поры клеточных мембран или стенок кровеносных сосудов под действием гидростатического и осмотического давления.

Законы гидродинамики лежат в основе гемодинамики и определяют закономерности движения крови в сердечно - сосудистой системе.

ВОПРОСЫ.

1. Сформулируйте закон Бернулли.
2. Что называется расходом жидкости? Определите единицы измерения расхода жидкости.
3. Выведите формулу для расчета работы по преодолению сил внутреннего трения жидкости.
4. От чего зависит сила внутреннего трения?
5. Что характеризует число Рейнольдса?
6. Дайте определение гидравлическому сопротивлению. От чего зависит это сопротивление?
7. Чем обусловлено статическое, динамическое и весовое давление, оказываемое жидкостью?
8. Промывка резервуара для хранения

§ 9. Физические свойства крови.

КРОВЬ. Кровь выполняет в организме животных важнейшие физиологические функции. В легких кровь обогащается кислородом, который она доставляет всем органам и тканям. В пищеварительном тракте кровь получает растворенные в нем составные части продуктов питания и разносит их по всему организму. Из клеток в кровь поступают некоторые продукты обмена веществ, которые она переносит к органам выделения: почкам, легким и коже.

Кровь выполняет также и чисто физическую функцию, так как при движении по кровеносной системе она, обладая большой теплоемкостью, обеспечивает перенос тепла, образуемого в процессе жизнедеятельности во всех частях организма, и способствует тем самым поддержанию постоянной температуры тела. Кровь - непрозрачная

молока осуществляется потоком воды, которая падает по трубе диаметром 50 мм со скоростью 5 м/с. Вычислите расход воды в трубе. 9. Скорость течения воды в некотором сечении горизонтальной трубы 5 см/с. Найдите скорость течения в этой части трубы, которая имеет в четыре раза меньше диаметр. 10. Молоко течет по горизонтальному молокопроводу со скоростью 2 м/с. Диаметр молокопровода 38 мм, на одном из участков диаметр трубы уменьшается до 30 мм. На сколько изменится давление молока в этом участке трубы?

вязкая суспензия красного цвета, состоящая из жидкой части - плазмы и взвешенных в ней кровяных клеток, называемых форменными элементами - эритроциты, лейкоциты и тромбоциты.

Относительное количество составных частей крови определяется

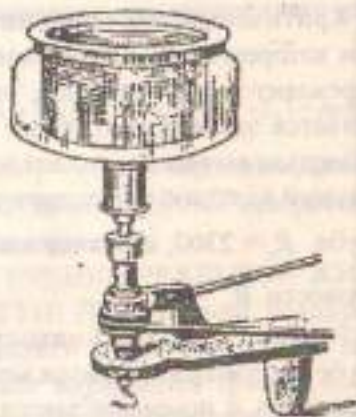


Рис. 57

центрифугированием. Как известно, если поместить в пробирку жидкость со взвешенными в ней частицами и привести пробирку во вращательное движение, то на каждую частицу, находящуюся на расстоянии от центра вращения, действует центробежная сила инерции:

$$F_c = (\rho - \rho_k) V \omega^2 r$$

где ρ - плотность частицы, ρ_k - плотность жидкости; V - объем частицы; ω - угловая скорость вращения.

Если $\rho > \rho_k$, то $F_c > 0$, т.е. сила направлена от центра вращения. Это значит, что более тяжелые, чем жидкость, частицы будут перемещаться от оси вращения ко дну пробирки.



Рис. 58

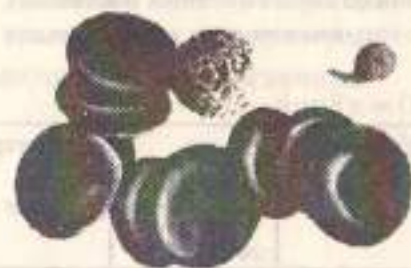


Рис. 59

Опыты показывают, что при центрифугировании крови эритроциты располагаются на дне пробирки, плазма находится в верхней ее части, а лейкоциты и тромбоциты образуют слой между эритроцитами и плазмой. Объем плазмы составляет 55-60% от всего объема крови, а объем форменных элементов 40-45%. Таким образом, кровь представляет собой суспензию высокой концентрации.

Плотность цельной крови у позвоночных $(1,042-1,053) \cdot 10^3$ кг/м³, плотность эритроцитов примерно $1,090 \cdot 10^3$ кг/м³, а плазмы - $(1,025-1,034) \cdot 10^3$ кг/м³.

Наличие в крови белков и ферментных элементов приводит к тому, что вязкость ее довольно велика. Так, относительная вязкость плазмы равна примерно 1,7-2,2, а вязкость цельной крови около 5,0 (эти данные приведены для 20 °С и для здоровых животных). При патологии вязкость крови изменяется.

Количество и состав крови у данного вида животных постоянно, но неодинаково для разных видов

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРОВИ И ЕЕ ФОРМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Животное	Масса крови к массе тела, %	Диаметр эрит., мкм.	Мил. эрит. в 1 мм ³ крови	Скорость оседания эрит., мм/ч	Давление крови, мм. рт. ст.
Человек	7	8			120/80
Мужчина			5	3-9	
Женщина			4	7-12	
Лошадь	10	6	9	64	180
Корова	8	5	6	58	120
Свинья	7	5	7	30	
Лягушка		23x16	0,38	50	
Птица		12x8	20		

точно определить форму и размеры эритроцитов очень трудно. Во-первых, потому что они меняют свою форму при движении в капиллярах, а во-вторых, потому, что их размеры немногим больше длины световой волны (0,5 мкм). При наблюдении эритроцитов в микроскопе их видимая форма искажается вследствие явления дифракции. При наблюдении же в электронном микроскопе их приходится фиксировать, что влечет за собой изменение механического состояния эритроцита по сравнению с его состоянием в потоке крови.

Если к крови для предотвращения свертывания добавить противосвертывающее вещество, то эритроциты оседают под действием

животных.

СКОРОСТЬ ОСЕДАНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ. Следует отметить, что

силы тяжести. Если в первом приближении считать эритроциты сферическими, то к ним можно применить закон Стокса и вычислить скорость их оседания.

Пусть небольшой шарик падает в вязкой жидкости. На него дей-

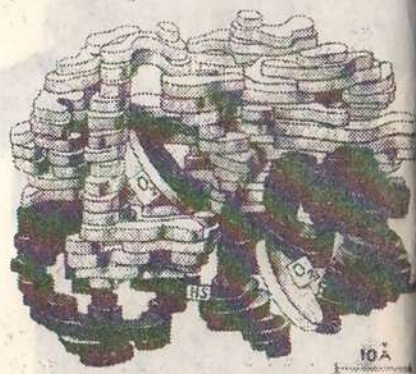


Рис.60

ствуют следующие три силы.

Сила тяжести, направленная вертикально вниз:

$$mg = \rho Vg = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g$$

где ρ - плотность материала шарика.

Выталкивающая или архимедова сила, направленная вертикально вверх:

$$F_a = \rho_g Vg = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_g g$$

где ρ_g - плотность жидкости.

Сила сопротивления Стокса, направленная вертикально вверх:

$$F_c = 6\pi\eta Rv$$

Уравнение движения шарика записываются в соответствии с законом Ньютона:

$$ma = F_a + F_c + mg$$

где a - ускорение падения шарика.

По мере падения шарика его

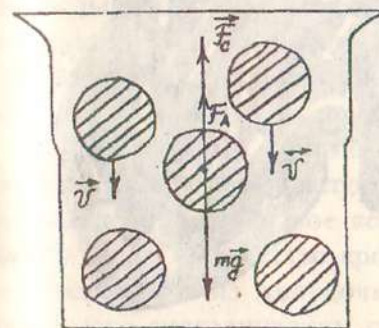


Рис.61

скорость станет постоянной и движение будет равномерным. Уравнение при этом принимает вид:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 g (\rho - \rho_g) - 6\pi\eta Rv = 0$$

Отсюда находим скорость движения шарика:

$$v = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_g}{\eta} g R^2$$

Однако такие вычисления дают скорость оседания эритроцитов (СОЭ) около 0,2 мм/ч, что значительно меньше скорости, наблюдаемой на опыте. Причина этого в том, что эритроциты могут склеиваться друг с другом, образуя своеобразные скопления, напоминающие по форме "монетные столбики". В результате эффективный радиус оседающих частиц увеличивается и увеличивается скорость их оседания.

Очень важно, что на скорость оседания эритроцитов (или на реакцию оседания эритроцитов - РОЭ) влияет также и состав плазмы. При воспалительных процессах, беременности и при некоторых других патологических состояниях организма РОЭ возрастает.

ВОПРОСЫ:

1. Из каких форменных элементов состоит кровь?
2. Каким методом можно выделить форменные элементы крови? В чем суть этого метода?
3. Какими физическими величинами характеризуется кровь?
4. Каковы физиологические функции эритроцитов?
5. Почему эритроциты

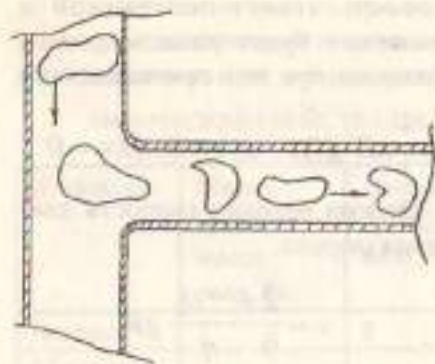


Рис.62

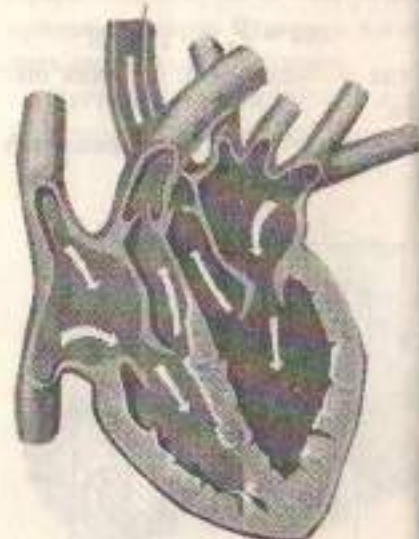
§ 10. Сердце как механическая система.

СЕРДЦЕ. Сердце является основным источником энергии, обеспечивающим движение крови в сосудистой системе. Преобразуя химическую энергию, заключенную в молекулах АТФ, в механическую работу, сердце обеспечивает ток крови.

С механической точки зрения сердце выполняет роль насоса в системе кровообращения. Оно представляет собой полый орган, состоящий у млекопитающих и у птиц из четырех обособленных камер, двух предсердий и двух желудочков. Сердце разделено на две половины, правую и левую, сообщающиеся между собой только через кровеносные сосуды. Правое предсердие получает кровь со всех частей тела, посылает ее в правый желудочек, откуда по легочной артерии кровь направляется к

оседают в крови? 6. Выдайте формулу для расчета скорости оседания эритроцитов. 7. Почему кровь проявляет явление вязкости? 8. Найдите силу, действующую при центрифугировании на ядра клеток печени, диаметр которых 8 мкм, плотность ядер 1300 кг/м^3 , радиус ротора центрифуги $0,05 \text{ м}$, частота вращения ротора 2 кГц .

легким. В легких она обогащается кислородом, и по легочной вене возвращается в левое предсердие и левый желудочек. Затем ритмическими сокращениями кровь раз-



HEART CYCLE

Рис.63

гоняется по всему организму.

Сокращения сердечной мышцы создают разность давления в артериальной и венозной системах, благодаря чему и возникает движение крови.

Фаза сокращения сердца называется систола, а расслабления - диастола. Цикл сердечной деятельности состоит из систолы и диастолы желудочков. Частота сердечных сокращений обычно тем больше, чем меньше масса животного (рис.64). Чем меньше масса

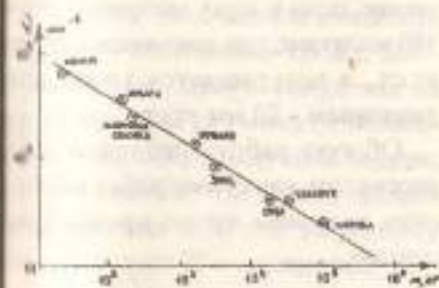


Рис.64

животного, тем больше у него отношение поверхности к объему и тем больше теплотеря в окружающую среду, а стало быть, тем больше должен быть обмен веществ и снабжение организма кислородом.

РАБОТА СЕРДЦА. При каждой систоле правый и левый желудочек выбрасывают одинаковое количество крови. Количество крови, выбрасываемое из желудочков, называется систолическим объемом, а в минуту - минутным

объемом. Минутный объем равен систолическому объему, умноженному на число сердечных сокращений в минуту:

$$V_0 = V_1 n$$

Вызывая движение крови в сосудистой системе, сердце совершает работу, которая превращается в энергию потока крови и расходуется на преодоление сопротивления вязкости в сосудистой системе. Оценить работу сердца можно приблизительно.

Венозная кровь, проходя через сердце, приобретает энергию, равную работе сердечной мышцы. Обозначим через A - работу сердца во время сокращения и через V - объем крови, выбрасываемый сердцем за время одного сокращения. Индексом 1 обозначим величины, относящиеся к артериальной крови, а индексом 2 - к венозной. Тогда работу сердца можно вычислить по формуле:

$$A = V \left[\Delta P + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 + v_2^2) + \rho g \Delta h \right]$$

$$\text{где } \Delta P = P_1 - P_2.$$

Данную формулу можно упростить, поскольку полая вена и аорта находятся практически на одном уровне, то $\Delta h = 0$. Скорость и давление крови в аорте значительно больше, чем в полой вене, а поэтому величинами v_2 и P_2 , в выражениях можно пренебречь. Отбрасывая для удобства индекс 1, получаем выражение для расчета работы сердца:

$$A = PV + \frac{\rho V v^2}{2}$$

где P и v - давление и скорость крови в аорте.

Для вычисления работы сердца необходимо, таким образом, знать величины объема крови, выбрасываемой сердцем за одно сокращение, давление крови в аорте и ее скорость при выходе из желудочка в аорту.

Начальная величина создаваемого сердцем кровяного давления зависит от сопротивления, которое встречает кровь по мере движения по сосудистой системе. У беспозвоночных животных с незамкнутой кровеносной системой давление очень мало (всего нес-



Рис.65

колько мм рт. ст.). У лягушек в черепах оно равно примерно 30-50 мм рт. ст., тогда как у млекопитающих - 100-130 мм рт. ст. В сердце можно сделать вывод, что в малом круге кровообращения кровь встречает значительно меньшее сопротивление, и начальное давление в легочной артерии примерно в 5 раз меньше, чем в аорте.

РАСЧЕТ РАБОТЫ СЕРДЦА

Расчет работы сердца можно показать, решив следующие задачи:

Задача 1. Рассчитать работу сердца в большом и малом круге кровообращения за одно сокращение, если в аорту выбрасывается 580 мл крови; под давлением 120 мм рт.ст., а возвращается кровь под давлением - 80 мм рт.ст.

Общую работу сердца можно рассчитать как сумму работ в большом и малом круге кровообращения:

$$A = A_1 + A_2$$

где:

$$A_1 = \Delta PV + \frac{\rho V v^2}{2}$$

$$A_2 = \frac{1}{5} \Delta PV + \frac{\rho V v^2}{2}$$

Тогда

$$A_1 = 3,3 \text{ Дж}$$

$$A_2 = 0,77 \text{ Дж}$$

$$A = 4,1 \text{ Дж}$$

Сердце человека за одно сокращение совершает работу, равную 4,1 Дж.

Анализируя числовые значения статической и гемодинамической составляющих в формуле работы сердца можно сделать вывод, что гемодинамическая составляющая крови мала по сравнению со статической. Поэтому можно пользоваться формулой работы без гемодинамической составляющей, т.е. работу сердца в первом приближении можно рассчитывать по следующей формуле:

$$A = \Delta PV$$

Задача 2. Рассчитайте мощность сердца и количество крови, выброшенное из левого желудочка во время систолы за 1 минуту, используя данные предыдущей задачи, если известно, что время одного сокращения 0,25с и за минуту сердце делает 70 сокращений.

Так как мощность - это работа сердца в единицу времени:

$$N = \frac{A}{t}$$

Из предыдущей задачи известно, что:

$$A_1 = 3,3 \text{ Дж}, \text{ тогда}$$

$$N = 13,2 \text{ Вт}$$

Так как минутный объем определяется по формуле:

$$V = V_1 n \quad V = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

В отличие от насоса, сердце работает без перерыва в течение всей жизни человека, сокращаясь,

например, за 70 лет жизни человека около 2,5 миллиарда раз и совершая за это время работу $3 \cdot 10^9$ Дж. Этой работы было бы достаточно, чтобы поднять товарный поезд на вершину Эльбруса. За 70 лет сердце выбрасывает в аорту такой объем крови, которое, если бы она не двигалась по замкнутой системе, могла бы заполнить канал длиной 5 км, по которому могли бы двигаться морские лайнеры.

Следует отметить, что при усиленной физической нагрузке мощность сердца возрастает в несколько раз, т.к. возникает необходимость более быстрого движения крови для улучшения снабжения кислородом органов и тканей. При этом дополнительная работа сердца расходуется на увеличение гидродинамического компонента.

Приведенные примеры и расчеты имеют приближенный характер, потому что мы не учитывали сжимаемость крови и зависимость ее коэффициента вязкости от скорости и ряда других причин.

ВОПРОСЫ:

- Объясните механизм сокращения сердца.
- Как рассчитать объем крови, выбрасываемый из сердца за одно сокращение?
- Выведите формулу работы сердца при сокращении.
- Во сколько раз работа в большом круге кровообращения больше, чем в малом?
- Объясните, почему при увеличении физической нагрузки увеличивается частота сокращений сердечной мышцы?

§ 11. Биофизические закономерности движения крови в сердечно-сосудистой системе.

ДВИЖЕНИЕ КРОВИ ПО СОСУДАМ. Все позвоночные обладают замкнутой системой кровообращения, состоящей из большого и малого кругов. Проходя по малому кругу, через легкие, кровь обогащается кислородом и поступает в левый желудочек сердца. Выбра-



Рис.66

сываясь в аорту, кровь движется по разветвляющимся элементам системы, по артериям и артериолам и, попадая в капилляры, выполняет свою основную функцию: снабжает кислородом клетки тканей и забирает от них продукты метаболизма. Затем кровь собирается в венулы и крупные вены и через полую вену вновь попадает в сердце.

Почти у всех млекопитающих, в том числе и у человека, один оборот крови по сосудистой системе соответствует 27 сокращениям сердца. За сутки кровь повторяет свои обороты 1,5 - 2 тысячи раз. Полный оборот крови у взрослого человека совершается за 20-28с, у ребенка - за 15 с.

БИОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КРОВИ. Рассмотрим первую биофизическую закономерность. При постепенном переходе от аорты к капиллярам сечение каждого из сосудов уменьшается, но поскольку число разветвленных сосудов возрастает, то общее их сечение также возрастает. Общий просвет капилляров примерно в 800 раз больше просвета аорты, поэтому, исходя из соотношения:

$$S_1 v_1 = S v_2$$

Скорость течения крови в капиллярах во столько же раз меньше, чем в аорте, во сколько общая площадь капилляров больше площади сечения аорты. Замедление тока крови в капиллярах имеет большое физиологическое значение, так как при большой скорости кровь не успевала бы обмениваться с кислородом.

Следующая закономерность движения крови в сосудистой системе проявляется при определении характера движения крови. Известно, что плотность крови имеет значение 1060 кг/м^3 , коэффициент вязкости $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па с}$, скорость крови в аорте $0,5 \text{ м/с}$, диаметр аорты 8 мм , можно определить число Рейнольдса

$$R_e = 800$$

Критическое значение числа Рейнольдса, при котором движение крови становится турбулентным 2000. Таким образом, $R_e < R_{cr}$, следовательно, движение крови в сосудистой системе при нормальных условиях всегда ламинарно.

Падение давления на участках потока, согласно закону Гагена - Пуазейля, пропорционально расходу крови в данном месте потока и его гидравлическому сопротивлению.

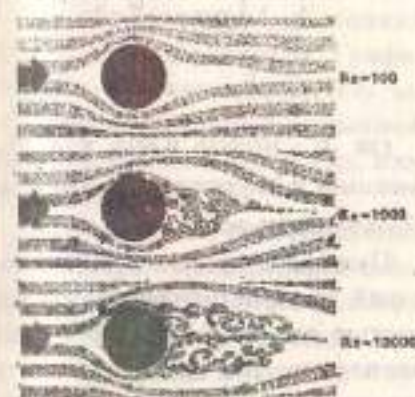


Рис.67

Если аорта разветвляется на капилляры, общее сечение которых в "k" раз больше сечения аорты, то падение кровяного давления на ответвлениях должно быть в n/k раз больше давления на участке аорты.

Однако, опыт показывает, что в кровеносной системе падение кро-

вяного давления на разветвленных сосудах больше, чем в крупных артериях. В артериях давление падает примерно на 20%, в артериолах на 50%, в капиллярах на 20%, и в венах, где скорость движения крови невелика, - на 10%.

Давление крови в сосудистой системе уменьшается от максимального до 0. В полной вене, вследствие присасывающего действия грудной клетки, давление "отрицательно", т.е. меньше атмосферного (Рис.68).

Стенки кровеносных сосудов неодинаковы по своему строению. В отличие от других сосудов, аорта и крупные артерии имеют эластичные стенки, состоящие, помимо мышечных волокон, из эластина и коллагена. Растяжение эластина очень велико, он допускает деформацию до 200-300%. Коллаген растягивается меньше. Мышечные

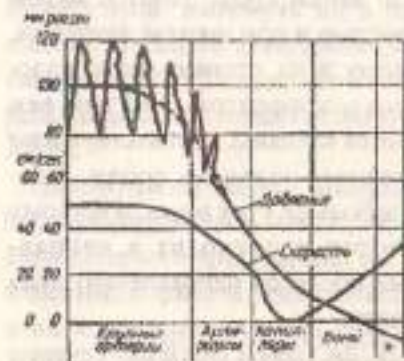


Рис.68

волокна, сокращаясь под действием нервных импульсов или химических стимуляторов, могут менять диаметр сосуда. Таким образом, эластичная и мышечная ткани осуществляют регулирование кровеносного русла.

С уменьшением диаметра сосуда доля эластичной ткани в них уменьшается, и уже артериолы почти полностью состоят из мышечной ткани, растяжимость которой значительно меньше. Стенки капилляров построены всего лишь из нескольких слоев клеток, не покрытых ни эластичной, ни мышечной тканями. Поэтому в капиллярах кровь движется практически равномерно. Эластичность клеток аорты и артерий позволяет поддерживать в капиллярах постоянную скорость потока крови и непрерывность снабжения клеток и тканей кислородом и питательными веществами.

По венам кровь течет с малой скоростью и при низком давлении, поэтому в их стенках мало эластичных элементов. Внутри вен имеются клапаны, препятствующие обратному течению крови. Клапанов больше в тех венах, в которых кровоток происходит в направлении, обратном направлению силы тяжести.

ПУЛЬСОВАЯ ВОЛНА. Течение жидкости по трубкам с эластичными стенками обладает определенной спецификой. В результате

давления жидкости растягиваются стенки такой трубки, и часть энергии потока превращается в потенциальную энергию упругой деформации стенки. Растяжение и последующее сжатие стенок эластичной трубы обеспечивают более равномерное протекание всей жидкости при пульсирующем насосе. Деформация стенки распространяется вдоль трубы и образует так называемую пульсовую волну. Скорость пульсовой волны приблизительно определяется по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{E(1 - (\frac{d}{D})^2)}{3\rho}}$$

где E - модуль Юнга, а d, D - внешний и внутренний диаметры, ρ - плотность жидкости.

Пульсовая волна в стенках артерий распространяется со скоростью около 10 м/с. Это легко проверить, так как от момента сердечного сокращения до появления импульса в лучевой артерии у человека происходит 0,1 с (расстояние от сердца до лучевой артерии составляет около 1 м). За это время кровь проходит в аорте расстояние всего лишь 5 см.

Пульсовая волна характеризуется частотой, соответствующей частоте сердечных сокращений, продолжительностью, напряжением, т.е. давлением, которым

можно сдавить артерию до исчезновения пульса. Поэтому различают пульс учащенный и уреженный, быстрый и медленный, высокий и низкий. Пульс отражает, таким образом, работу сердца и кровяного давления в сосудах, его исследование является одним из важных диагностических приемов в медицинской и ветеринарной терапии.

У человека пульс обычно исследуют на запястье левой руки. У сельскохозяйственных животных - в определенных артериях: у лошади на наружной подчелюстной, у коров на лицевой, у мелких животных на бедренной. Графически пульсовая кривая, т.е. зависимость давления в пульсовой волне от времени, имеет вид, изображенный на рис.69.

В процессе старения организма, также при определенных заболеваниях, чрезмерно обильном питании, а у человека также при употреблении алкоголя и курении, возникает атеросклероз, утолщение и уплотнение стенок артерий за счет отложения на их внутренней поверхности холестерина и атеросклеротических бляшек. Это ведет к



Рис.69

сужению просвета артерий и к потере их стенками эластичности. Поскольку, как следует из закона Гагена - Пуазейля, гидравлическое сопротивление трубы растет обратно пропорционально четвертой степени ее радиуса, давление в сосуде должно увеличиваться в такой же степени, так как расход крови остается неизменным. При этом затрудняется работа сердца. Кроме того, уменьшение стенок артерии влечет за собой нарушение равномерности потока крови и ухудшение снабжения кровью клеток и тканей.

Особый интерес представляет движение крови в капиллярах. Эти сосуды настолько малы, они в 50 раз тоньше человеческого волоса, но общая площадь их поперечного сечения равна у человека 50 м, что в 25 раз больше поверхности тела. У человека насчитывается до 150 миллиардов капилляров. Если бы можно было вытянуть их в одну линию, то длина этой линии составила бы 80000 км, что всего в 4,5 раза меньше расстояния от Земли до Луны.

Несмотря на то, что капилляры были обнаружены в 1661 г., нам до сегодняшнего дня далеко не все известно о физических свойствах этих микроскопических сосудов. Точно не известны упругие свойства и структура их стенок. Во многом неясен процесс проталкивания эритроцитов через капилляры, так

как диаметр эритроцитов сравним, а иногда даже и больше диаметра капилляра. Известно, что при подходе к капилляру эритроцит, благодаря гибкости своей оболочки, меняет форму, что позволяет ему протискиваться в малое для него отверстие. Под действием ряда причин просвет капилляров может изменяться. Так в покоящейся мышце часть капилляров закрыта. Когда же наступает необходимость интенсивного снабжения мышцы кислородом в процессе ее работы, бездействующие капилляры открыва-

§ 12. Физические основы измерения артериального давления крови.

НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ КРОВИ. Для непосредственного измерения артериального давления в артерию вводится изогнутая игла - канюля, представляющая собой трубку Пито. Канюля соединена с манометром или самописцем, позволяющим вычерчивать кривую изменения давления крови в артерии. Этот метод позволяет измерить полное давление потока крови, которое является суммой статического, динамического и весового давления. Недостатком этого метода является то, что он связан с потерей крови и болевым ощущением у человека и животных.

ваются. Другие кровеносные сосуды также могут изменять свой просвет под воздействием условно рефлекторной деятельности коры головного мозга.

ВОПРОСЫ:

1. Перечислите биофизические законы равномерности движения крови. 2. Чем обусловлено явление возникновения пульсовой волны? 3. Почему в венозной системе пульсовая волна не обнаруживается? 4. Почему в вене скорость крови увеличивается? 5. Может ли кровь в сердечно-сосудистой системе двигаться турбулентно? 6. Почему при движении крови ее скорость в сосудистой системе уменьшается?

БЕСКРОВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ. В медицине широко используется бескровный метод измерения артериального давления по Короткову. Этот метод впервые был



Рис.71

предложен итальянским ученым Роччи и в дальнейшем развит русским ученым Н.Е.Коротковым. Он основан на том, что внешнее давление, приложенное к участку тела живого существа, передается без изменения посредством деформации мягких тканей. Если внешнее давление на стенки артерии больше давления крови в артерии, то артерия пережимается и движение крови в ней прекращается. При равенстве артериального давления крови внешнему давлению кровь с трудом проталкивается через артерию, диаметр артерии уменьшается, скорость крови увеличивается, возникают турбулентные вихри, сопровождающиеся шумами (тонами Короткова). Измеряя внешнее давление в момент появления этих шумов, определяют систолическое давление.

При плавном уменьшении внешнего давления происходит пос-



Рис.72

тепленное увеличение просвета сжатой артерии, а в тот момент, когда движение становится ламинарным, шум исчезает. Измеряя внешнее давление в момент исчезновения шумов, определяют диастолическое давление в артерии.

Измерение давления у животных производят на плечевой, бедренной, височной артериях или на основании хвоста. У человека артериальное давление измеряется на плечевой артерии.

Приборы для измерения артериального давления, основанные на использовании этого метода, получили общее название - сфигмоманометры.

ИССЛЕДОВАНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА.

Задание 1.

Измеритель артериального давления мембранный общего назначения сфигмо-тонометр предназначен для измерения систолического и диастолического артериального давления методом Короткова. В комплект сфигмоманометра входит пневматический нагнетатель (груша), компрессионная манжета, мембранный манометр (рис.72). Манжета служит для сжатия артерии. Она представляет собой плоскую резиновую камеру с двумя патрубками для соединения ее через резиновые шланги с грушей и манометром. Резиновая камера помещена в ма-



Рис.72

терчатый чехол, который имеет текстильную застежку. Груша нагнетает воздух в манжету и создает в ней необходимое давление. На лицевой стороне груши имеется ручка регулирования давления и стрелка, указывающая направление вращения ручки регулятора. При вращении ручки по стрелке выпускной клапан, находящийся в основании груши, закрывается и сжатие груши сопровождается нагнетанием воздуха в манжету. При вращении ручки против стрелки выпускной клапан открывается и воздух из манжеты выходит наружу, давление в манжете уменьшается.

Мембранный манометр служит для измерения давления в ком-

прессионной камере манжеты. Шкала манометра проградуирована в мм рт. и имеет цену деления 2 мм рт. ст. Манометр рассчитан на изменение давления от 20 до 300 мм рт. ст. В комплект прибора входит фонендоскоп, предназначенный для прослушивания тонов Короткова. У человека измерение обычно производится на плечевой артерии локтевого сгиба (рис.72)

Задание 2.

1. Измерьте артериальное давление у пациента.

Для этого:

а) Соедините манжету с манометром грушей при помощи штуцера;

б) Наложите манжету на плечо пациента до полного прилегания (рис.73). При этом следует учесть, что артерия должна находиться по пневмокамерой в области текстильной застежки, ближе к па-
рубку;

в) Закройте регулятор пневмоческого нагнетателя по направлению стрелки;

г) Установите головку фонен-



Рис.73

доскопа над артерией в области локтевой впадины ниже манжеты;

д) Ритмично сжимая нагнетатель создайте давление в манжете на 30 - 50 мм рт. ст. выше предполагаемого систолического давления пациента (150-170 мм рт. ст.);

е) Медленный поворот регулятора против стрелки обеспечит плавное снижение давления в манжете, при этом следите за показаниями манометра;

ж) В момент появления первого из тонов Короткова зафиксируйте по манометру значение систолического давления, а при их исчезновении -

диастолического давления;

з) Поверните ручку регулятора против стрелки до положения, обеспечивающего быстрое снижение давления в манжете;

и) Через 1-2 минуты выполните все действия по предыдущим пунктам еще 2 раза;

к) Снимите манжету.

2 Результаты измерений обрабатывайте по методике многократного непосредственного измерения и занесите в таблицу отчета. Результат измерения артериального давления выразите в Паскалях.

п/п	Измеренное значение артериального давления крови, мм рт.ст.		Результат измерения артериального давления			
			Давление в мм рт. ст.		Давление в Па	
	Систолич	Диастол	Систолич	Диастол	Систолич	Диастол
1						
2						

Задание 3.

Исследование артериального пульса и измерение минутного объема кровотока.

1. Включите секундомер;

2. Подушечками второго и третьего пальцев нащупайте артерию на своем запястье;

3. Измерьте число пульсаций в течение минуты ;

4. Приняв средний систолический объем человека (объем крови, выбрасываемый сердцем за 1 сокращение) $V_0 = 65$ мл, измерьте

объем крови, выбрасываемый вашим сердцем за 1 минуту:

$$V = V_0 \nu$$

5. Обработайте результаты измерений, пользуясь следующими формулами:

$$\Delta V = \delta_v \nu \quad \delta_\nu = \delta_{V_0} + \delta_\nu$$

$$\delta_{V_0} = \frac{\Delta V_0}{V_0} \quad \delta_\nu = \frac{\Delta \nu}{\nu}$$

где ΔV_0 - найти как абсолютную погрешность величины, известной

заранее; Δt - найти по методике заранее непосредственных измерений прибором с неизвестным

классом точности.

6. Результаты измерений занесите в таблицу.

Частота пульса, уд/мин	Систолический Объем, мл	Измеренное значение объема крови, л	Относит. Погрешность	Абсолют. Погрешность	Результат измерения минутного объема, л

4. Сделайте вывод о влиянии физической нагрузки на изменение пульса и артериального давления.

5. Оформите заключение по работе в целом.

ВОПРОСЫ:

1. В чем суть кровяного метода изме-

рения давления? 2. На чем основан бескровный метод измерения артериального давления крови? 3. Расскажите об устройстве и принципе действия прибора для измерения артериального давления крови. 4. Как вы измеряли давление крови? 5. Объясните погрешности, полученные при измерении. 6. Почему при физической нагрузке сердца изменилось давление?

УПРАЖНЕНИЕ 4.

1. Общая площадь сечения капилляров у крупных млекопитающих примерно в 800 раз больше площади сечения аорт. Какова скорость крови в капиллярах, если в аорте скорость крови 0,5 м/с? Трением пренебречь.

2. Для непосредственного измерения давления крови в артерию лошади вводят канюлю, соединенную с ртутным манометром. Каково статическое давление крови в артерии, если разность уровней в манометре 10 см и скорость крови в артерии 400 мм/с?

3. Какой объем крови протекает через кровеносный сосуд длиной 50 мм и диаметром 3 мм за 1 минуту, если на концах его поддерживается разность давлений в 2 мм рт. ст.?

4. В восходящей части аорты диаметром 3,2 см максимальная скорость крови достигает значения 60 см/с. Будет ли при этих условиях течение крови ламинарным или турбулентным? Критическое значение числа Рейнольдса при движении жидкости в гладкой цилиндрической трубе принять равной 2300.

5. При каждом биении человеческого сердца левый желудочек выталкивает аорту 70 г крови под давлением 100 мм рт. ст. За минуту происходит 75 сокращений. Определите работу, совершаемую сердцем в течение часа, если скорость крови в аорте 0,5 м/с.

6. Определите плотность эритроцитов в крови свиньи, если скорость

оседания эритроцитов 8 мм/ч, считая, что эритроциты имеют форму шарика и диаметр 5 мкм.

7. Определите время протекания крови через капилляр вискозиметра, если вода протекает через него за 20 с.

8. Определите диаметр слипшихся эритроцитов при воспалительном процессе, если скорость их оседания 64 мм/ч. Эритроциты считать сферическими шариками.

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЕМОДИНАМИКИ.

В данном разделе рассмотрены основные закономерности движения крови в сердечно-сосудистой системе. Можно в заключение сделать следующие выводы:

1. Для описания движения крови применяются законы гемодинамики, которые рассматривают не только движение идеальной, но и реальной.

2. Движение крови можно в первом приближении описать с помощью законов гемодинамики. Однако при этом нужно учитывать, что кровь - это реальная жидкость, в которой находятся форменные элементы. Форменные элементы могут вносить существенные изменения в движение крови. Состояние крови можно описать с помощью физических параметров: давления, вязкости крови, скорости оседания эритроцитов.

3. Сердце обеспечивает движение крови в сосудистой системе, преобразует химическую энергию в механическую. Работу сердца можно рассчитать. При усилении физических нагрузок увеличивается частота сердечных сокращений и мощность сердца возрастает.

4. Сосудистая система существенно отличается от простой тем, что может деформироваться, тем самым обеспечивать равномерное движение крови. Скорость крови в различных участках системы не одинакова. Наибольшее ее значение в артериях, а наименьшее в капиллярах.

Акустикой называется раздел физики, в котором изучаются явления испускания, распространения и восприятия звуковой волны слуховым анализатором.

Звук представляет собой упругие волны, распространяющиеся в разнообразных, жидких и твердых веществах с частотами от 0 до 10^{13} Гц. В узком смысле под звуком понимают субъективные ощущения, которые возникают в результате воздействия на звуковой аппарат человека или животного.

Биоакустика - это раздел акустики, изучающий общие закономерности субъективного восприятия и излучения звука живыми существами. Так, человек воспринимает своим слуховым аппаратом частоты от 16 Гц до 20000 Гц. Принято считать, что звуки ниже 16 -инфразвук, а выше 20000 Гц - ультразвук.

§ 13 Кинематические характеристики звуковой волны.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. Принято различать следующие звуки: тоны (музыкальные звуки), шумы, звуковые удары.

Звуковые колебания, происходящие с определенной частотой, не меняющейся с течением времени, называются тонами.

Тон - это звук, имеющий определенную периодичность. Если процесс гармоничный, то тон называется простым или чистым. Если процесс агармоничный, то колебаниям соответствует сложный тон. Простой тон издает камертон, сложный тон - музыкальный инструмент, аппарат речи.

Чем больше частота, тем более высоким по тону воспринимается звук. Так мычание быка соответствует частоте 50 Гц, а комариный писк - соответствует частоте

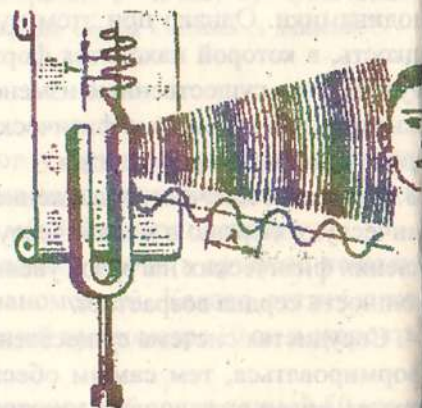


Рис.74

порядка 10 кГц.

Сложный тон может быть разложен на простые. Наименьшая частота такого разложения соответствует основному тону, остальные гармоники, кратные основной частоте, называются обертонами.

Основной тон вместе с оберто

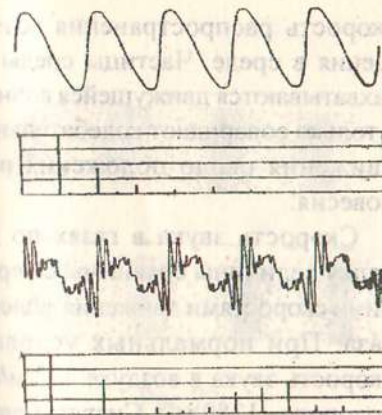


Рис.75

нами определяет акустический спектр звука, создаваемый наложением волн. Для графического изображения сложного колебательного процесса удобно строить спектральные диаграммы, на которых по горизонтальной оси откладываются частоты колебаний, а по вертикальной оси - величины амплитуд основного тона и обертонов. Так на рис.76 изображен спектр колебаний одной и той же ноты, взятой на рояле и кларнете. Из рисунка видно, что основной тон у инструментов одинаков, а обертоны различны. Обертоны определяют тембр звука.

Тембром называется качество звука, которое независимо от основной частоты и интенсивности, позволяет отличить звучание одного источника от звучания другого. Так, человек легко отличает один и тот же музыкальный тон, создаваемый

скрипкой и гитарой. Даже инструменты одного и того же типа обладают слегка различными тембрами, которые определяют качество инструмента.

Если в спектре сильно выражены разночастотные обертоны, то тембр сочный, полный. При сильно выраженных обертонах в области 36 кГц звук приобретает металлическую окраску, становится пронзительным. Музыканты различают в звуках инструментов глубину, бархатистость, певучесть и т.п. Все эти субъективные ощущения, создаваемые звуком, определяются его спектром.

Произносимые человеком гласные звуки представляют собой тоны со значительным количеством обертонов. Спектральный состав гласных звуков для человека является неповторимым, поэтому в судебной

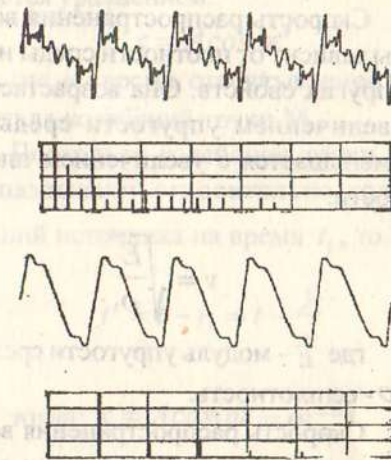


Рис.76

практике становится возможным опознание человека по спектральному составу его голоса.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ. Акустические волны в твердых телах могут быть поперечные и продольные, а в жидкостях и газах только продольные. Продольные волны представляют собой чередование сгущений и разрежений среды, распространяющихся от источника с определенной скоростью. Скорость волны связана с частотой волны соотношением:

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

где λ - длина звуковой волны ν - скорость волны ν - частота.

Длина звуковой волны - это расстояние между двумя ближайшими точками среды, совершающими колебания в одинаковых фазах.

Скорость распространения волны зависит от плотности среды и ее упругих свойств. Она возрастает с увеличением упругости среды и уменьшается с увеличением плотности:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

где E - модуль упругости среды, ρ - ее плотность.

Скорость распространения волны нельзя рассматривать как скорость движения частиц среды, это

скорость распространения возмущения в среде. Частицы среды не захватываются движущейся волной, а только совершают колебательные движения около положения равновесия.

Скорость звука в газах по порядку величины сравнимы со средними скоростями движения молекул газа. При нормальных условиях скорость звука в воздухе 332 м/с, в водороде - 1280 м/с. Скорость звука в различных жидкостях находится в пределах 1-2 км/с. Поскольку мягкие ткани человека и животных состоят в значительной степени из водных растворов, то скорости распространения звука в них почти такая же; в мягких тканях - 1500-1600 м/с, в жировых тканях - 1440-1480 м/с.

Скорость звука некоторых веществ в тканях человека(м/с).

Вещество	скорость м/с
Воздух	331
Вода	1497
Сталь	5100
Гладкие мышцы	1550
Жировая ткань	1460
Мозг	1520
Печень	3660
Хрусталик	1650
Стекловидное тело	1530

При повышении температуры

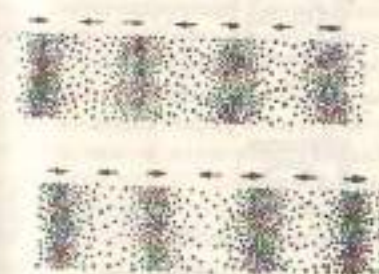


Рис.77

воздуха скорость распространения звуковой волны возрастает, так как при этом возрастает упругость воздуха.

В воде скорость звука зависит также от температуры. При повышении температуры от 0 до 74 С° скорость распространения звуковой волны увеличивается и достигает 1356 м/с. Дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению скорости звука.

УРАВНЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ. Процесс распространения звуковой волны можно описать математически в виде уравнения волны. Это уравнение связывает смещение точки среды с координатой для любого момента времени.

На рис.78 представлено пространственное размещение частиц среды в поперечной волне.

Если в источнике волны совершается гармоническое колебание по закону:

$$x = A \cos \omega t$$

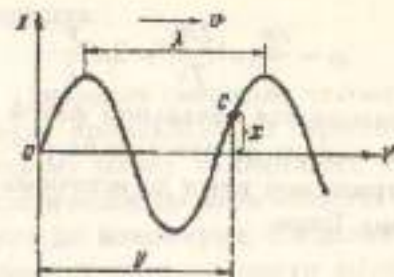


Рис.78

то волна, распространяясь в среде со скоростью v , достигает некоторой точки M , удаленной от источника на расстояние y , через промежуток времени t_1 . С этого момента времени точка начинает совершать гармонические колебания с той же амплитудой и частотой, что и источник, находящийся в точке O .

Колебания точки M описывается уравнением:

$$x = A \cos \omega t'$$

где t' - время, отсчитываемое от начала колебаний точки M .

Поскольку колебания точки M запаздывают относительно колебаний источника на время t_1 , то

$$t' = t - t_1 = t - \frac{y}{v}$$

$$\text{тогда: } x = A \cos \left(\omega t - \omega \frac{y}{v} \right)$$

В уравнении величина:

$$\varphi = \frac{\omega y}{v} = \frac{2\pi y}{Tv} = 2\pi \frac{y}{\lambda}$$

называется начальной фазой. Она зависит от расстояния рассматриваемой точки до источника волны. Тогда:

$$x = A \cos(\omega t - 2\pi \frac{y}{\lambda})$$

а величину: $k = 2\pi/\lambda$ называют волновым числом. Окончательно получаем уравнение волны:

$$x = A \cos(\omega t - ky)$$

Таким образом, смещение точек среды от положения равновесия является периодической функцией времени и координаты.

ВОПРОСЫ:

1. Что называется простым и сложным

§ 14 Звуковые явления.

1. ЭНЕРГО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. Пространство, заполненное веществом, в котором распространяются звуковые волны, называется акустическим полем. Акустическое поле характеризуется энергией, интенсивностью и звуковым давлением.

Звуковая волна, распространяясь в среде, переносит энергию, излучаемую источником.

Интенсивность волны - это

тоном? 2. Что такое обертоны? 3. Чем определяется тембр звука? 4. Могут ли звуковые волны распространяться в вакууме? 5. От чего зависит высота тона и тембр звука? 6. Влияет ли температура среды на скорость распространения звука? 7. От чего зависит скорость звука в воздухе? 8. Как математически можно описать волновой процесс? 9. Что называется начальной фазой волны? Определите максимальное и минимальное значение длины звуковой волны, воспринимаемой человеческим ухом, соответствующей граничным частотам 16 Гц и 20 кГц. 11. Наблюдатель, находящийся на расстоянии 800 м от источника звука, слышит звук, пришедший по воздуху за 1,78 с позднее, чем звук, пришедший по воде. Найти скорость звука в воде. 12. Максимальная чувствительность уха коровы к звукам лежит в области 0,8-3 кГц. Вычислите соответствующие этому диапазону длины волн. 13. Верхний предел частоты звука, воспринимаемого летучей мышью находится в области ультразвука и равен 150 кГц. Определите длину волн, соответствующую этому звуку.

энергетическая характеристика, численно равная количеству энергии, переносимой волной в единицу времени через площадь поверхности, расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны:

$$J = \frac{W}{St}$$

где S - площадь поверхности; t - время, в течение которого волна

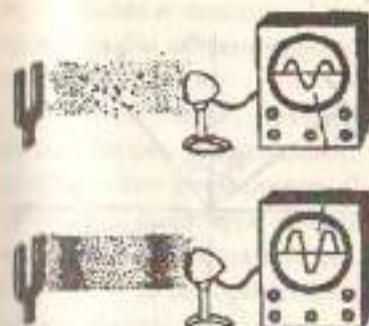


Рис. 79

проходит через эту поверхность.

С помощью простых преобразований можно показать, что интенсивность волны можно определить по формуле:

$$J = \frac{1}{2} S v A^2 \omega^2$$

где ρ - плотность вещества; A - амплитуда колебаний волны; ω - циклическая частота; v - скорость звука.

В процессе распространения звуковая волна оказывает силовое воздействие на объекты, находящиеся в акустическом поле. Силовое воздействие звуковой волны характеризует акустическое давление.

Акустическим давлением называется добавочное давление (над атмосферным), образующееся в участках сгущения частиц в волне. Акустическое давление зависит от амплитуды волны, ее скорости, циклической частоты и плотности

вещества:

$$P = \Delta w \rho v$$

Поскольку смещение частиц в волне происходит по гармоническому закону, то очевидно, что акустическое давление меняется от нуля до максимума. Выделив в формуле интенсивности волны акустическое давление, можно записать выражение, связывающее эти две характеристики:

$$J = \frac{P}{2\rho v}$$

Величину, равную произведению плотности среды на скорость звуковой волны в этой среде, называют акустическим сопротивлением среды.

$$z = \rho v$$

Акустические параметры некоторых веществ при 20 С приведены в таблице.

Вещество	Плотность (кг/м ³)	Скорость звука (м/с)
Воздух	1,3	332
Вода	1,0*10 ³	1442
Дерево	500	5000

Акустическое сопротивление - важная характеристика акустического поля. Она дает представление об особенностях строения вещества, в котором распространяется звук.

Таким образом, интенсивность звука прямо пропорциональна

квадрату акустического давления и обратно пропорциональна акустическому сопротивлению среды.

$$J = \frac{\Delta P^2}{2z}$$

Значение звукового давления в этом законе рассматривается как избыточное давление над атмосферным.

Прозвонительный, еле воспринимаемый человеком звук гудка локомотива создает избыточное давление в 90 Па. Тогда интенсивность в воздушной среде можно просто определить, она равна 9,4 Вт/м²

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ. Звуковая волна проявляет свойства присущие любой волне. Если размеры препятствия сравнимы с длиной волны, то волны огибают препятствие. Поскольку звуки речи и музыки в основном находятся в диапазоне длин волн от метра до десятка метров, то мы можем слышать звуки от источника за углом дома, так как звуковые волны огибают препятствия. Это явление называется дифракцией звуковой волны.

При падении звуковой волны на границу раздела двух сред, часть волны может отразиться (2), а часть преломиться (3) и перейти в другую среду.

Доля звуковой энергии, прошедшей из одной среды в другую,

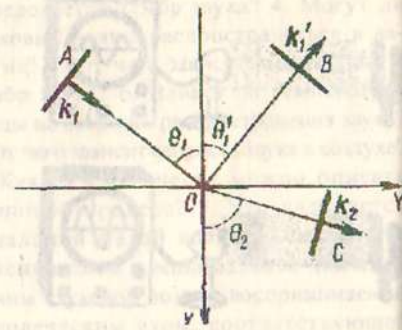


Рис.80

зависит от соотношения между акустическими сопротивлениями обеих сред. Коэффициент проникновения звуковой волны численно равен отношению интенсивности звука во второй среде к интенсивности звука в первой среде:

$$\beta = \frac{J_2}{J_1} = \frac{4 \frac{v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2}}{\left(\frac{v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2} + 1\right)^2}$$

Тогда коэффициент отражения можно определить по формуле:

$$r = 1 - \beta$$

где r - коэффициент отражения.

Пусть звук переходит из воды в воздух. Тогда, если оценить коэффициент проникновения в этих средах, то $\beta = 1,2 * 10^{-3}$. Таким образом, из воды в воздух переходит очень малое количество энергии звука. В самом деле, мы слышим звуки, издаваемые наземными

животными и никогда не слышим, чтобы рыбы обменивались звуковыми сигналами.

Исследования, проведенные океанологами, показывают, что в океане стоит несмолкаемый шум. Этот шум создается обитателями океана, испускающими звуковые сигналы в целях ориентировки, во время охоты и брачных игр, в момент опасности. Сегодня собраны обширные фонотеки голосов жителей океана, и эти записи используются как биологами, так и рыболовами для обнаружения рыбных косяков и для их приманки.

Однако несмотря на то, что море наполнено звуками, человек не в состоянии услышать эти «голоса» из-за того, что из воды в воздух выходит лишь десятая доля процента тех звуков, которые распространяются в воде. Даже погрузившись в воду, человек не может хорошо слышать звуки потому, что барабанная перепонка рассчитана на колебания в воздухе, а не в воде.

Тем не менее, как хорошо известно рыбакам, рыбы слышат звуки, издаваемые людьми на берегу, несмотря на то, что доля интенсивности звука, переходящего из воздуха в воду, так же мала, как и доля интенсивности звука, переходящего из воды в воздух. Это явление объясняется тем, что из-за большой скорости звука в воде и большой ее плотности, даже при малой интенсивности, величина

избыточного давления в воде довольно значительна.

$$\frac{P_2}{P_1} = \sqrt{\frac{J_2 \rho_2 v_2}{J_1 \rho_1 v_1}} = 2$$

Таким образом, величина акустического давления звука, переходящего из воздуха в воду, в два раза больше, чем в воздухе. И, следовательно, звуки человеческой речи в воде становятся в два раза сильнее. Наоборот, при переходе звука из воды в воздух значение акустического давления резко снижается.

ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА. При распространении звуковой волны ее энергия расходуется на колебательные движения частиц вещества. Поэтому энергия волны уменьшается, и волна «затухает».

При затухании звука, обусловленном рассеянием и поглощением, интенсивность звука уменьшается по экспоненциальному закону:

$$J = J_0 e^{-\chi l}$$

где J_0 и J - интенсивности звука на поверхности вещества и на расстоянии l от поверхности, χ - коэффициент затухания, который определяется по формуле:

$$\chi = \frac{16\pi^2 \eta}{3\nu\rho\lambda^2}$$

где λ - длина волны; η - коэффициент вязкости. Знак «-» в законе указывает, что интенсивность вол-

ны уменьшается в процессе ее распространения.

Коэффициент затухания сильно уменьшается при увеличении длины волны. В связи с этим, звуки высокой частоты не распространяются в воздухе на далекие расстояния. Если необходимо, чтобы звук был слышен далеко, выгоднее использовать низкокачественные источники звука. Большое затухание звука происходит в неоднородных и пористых телах в связи с тем, что звук отражается на границах раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями. Известно ослабление звука мягкими тканями и материалами.

Ультразвук имеет малую длину волны, сильно поглощается в воздухе, но в жидкостях его поглощения меньше, так как плотность жидкости в тысячу раз больше плотности газов. В жидкостях с большой вязкостью поглощения звука возрастает. Сильно уменьшается интенсивность ультразвука при распространении его в био-

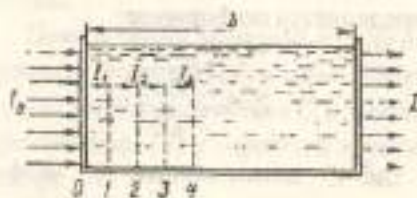


Рис.81

логических тканях из-за многочисленных отражений в волокнах соединительных структур.

Коэффициент затухания ультразвука (УЗ) в биологических тканях представлен таблице.

Вещество	Частота УЗ (мГц)	Коэффициент затухания
Вода	1,00	0,01
Кровь	1,00	2,5
Жировая ткань	0,87	14
Мышцы	0,87	16
Печень	0,87	15
Кожа	1,00	40
Кость	0,88	71

Слабое поглощение звука в помещениях - нежелательное явление, так как каждая новая часть звуковой волны перекрывается еще не отзвучавшими. В результате слабого поглощения понятие звуковой сигнал становится затруднительно, возникает эффект гулкости помещения. Гулкость обычно наблюдается в комнате, из которой вынесены все вещи, которые в определенной степени поглощали звук. Такое постепенное затухание называется явлением реверберации.

Акустические свойства помещения принято характеризовать временем реверберации. Время реверберации - время, в течение которого интенсивность звука в

помещении уменьшается до одной минимальной доли ее начального значения. Оптимальное значение времени реверберации, при котором слышимость в помещении наилучшая, определяется экспериментально. Принято считать, что в жилых помещениях время реверберации должно быть 1,06 с, а в учебном помещении 1,5с.

§ 15. Звук как психофизическое явление.

ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ. Психофизика изучает субъективные ощущения, которые возникают в результате воздействия различных внешних факторов на человека и животного. К основным психофизическим характеристикам звуковой волны относятся высота, тембр, интенсивность звука, громкость, предел слышимости, порог болевого ощущения и т.п.

Органы слуха человека и животного могут воспринимать колебания только в определенном диапазоне интенсивностей. Нормальное человеческое ухо при частоте 1кГц не воспринимает звук с интенсивностью менее 10-12 Вт/м². Этот результат был получен в итоге многочисленных исследований, проведенных с различными людьми, и называется нижним порогом слышимости. При меньшей интенсивности, звуковая волна не может привести в колебательное движение

ВОПРОСЫ.

1. Что называется интенсивностью звуковой волны? От чего зависит интенсивность волны? 2. Выведите формулу для расчета акустического сопротивления. 3. От каких факторов зависит явление отражения и преломления звука? 4. Почему звуки, идущие из воды, не воспринимаются нашим звуковым анализатором? 5. От чего зависит коэффициент затухания звуковой волны? 6. Что такое реверберация звука?

барабанную перепонку. Максимальная интенсивность колебаний, воспринимаемая субъективно, как звук, при той же частоте равна 10 Вт/м² называется болевым порогом, поскольку человек начинает испытывать болевые ощущения. При большей интенсивности может произойти разрыв барабанной перепонки.

Различие между нижним порогом слышимости и порогом болевых ощущений очень большое (10¹¹). Поэтому, чтобы при измерении интенсивностей не оперировать с

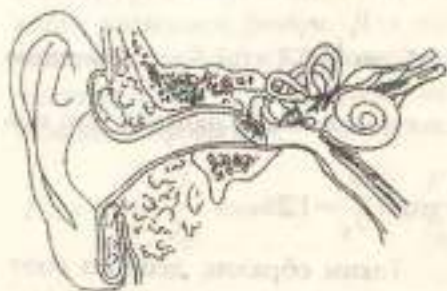


Рис.82

очень малыми или очень большими величинами, удобно пользоваться не самими величинами, а их логарифмами. В связи с этим вводится понятие уровня интенсивности звука, которое определяется соотношением:

$$L = \lg \frac{J}{J_0}$$

где J - интенсивность переменного звука; J_0 - нижний порог слышимости.

Уровень интенсивности измеряется в белах (Б). Из формулы следует, что при $J = 10J_0$, $L = 1Б$.

Таким образом, бел - есть единица уровней интенсивности звука, соответствующая изменению интенсивности в 10 раз.

Обычно применяется единица в 10 раз меньшая, называемая децибелами (дБ), и тогда формула принимает вид:

$$L = 10 \lg \frac{J}{J_0}$$

Отсюда следует, что если $L = 1дБ$, то $\lg \frac{J}{J_0} = 0,1$. Тогда, вычислив логарифм числа, находим, что при этом $\frac{J}{J_0} = 1,26$.

Таким образом, децибел соответствует таким двум уровням интенсивности которых отличается

в 1,26 раза.

Часто в акустике вместо уровней интенсивности звука используют уровни акустического давления. Для нижнего порога слышимости величина звукового давления равна $P=2 \cdot 10^{-5}$ Па, а для болевого порога $P=63$ Па. Тогда уровень акустического давления можно определить, учитывая, что

$$\frac{J}{J_0} = \frac{P^2}{P_0^2} \text{ и } L = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$

Таким образом, вся система уровней интенсивности и акустического давления может быть разделена на 13 белов или 130 децибелов.

Чувствительность уха к звуковым колебаниям неодинакова для различных тонов.

На рис.83 приведены графики зависимости пороговых значений интенсивности звука для нормального человеческого уха от

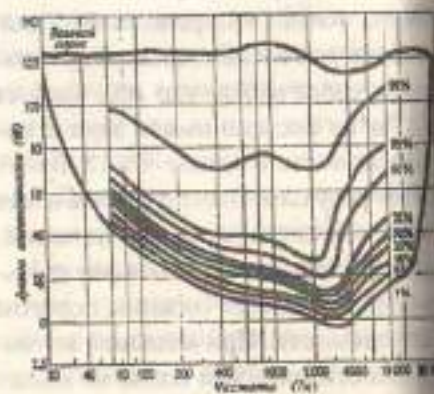


Рис.83

частоты. Между этими кривыми находится область слышимых человеком звуков. Поскольку частота и интенсивность слышимого звука изменяются в очень широких пределах, эти величины отложены на координатных осях в логарифмическом масштабе.

Для большинства людей область слышимости несколько меньше той, которая показана на рисунке. Затрихованная область соответствует частоте и интенсивности, присутствующей в человеческой речи, а также в музыке, оптимально воспринимаемой человеком и вызывающей у него эстетическое чувство.

ЗАКОН ВЕБЕРА-ФЕХНЕРА. Интенсивность звука создает у человека субъективное ощущение громкости. Громкость звука есть уровень слухового ощущения. Субъективность ощущения громкости звука связана с различной чувствительностью уха к возбуждению звуковой волны, которая зависит как от характеристики волны, так и от физиологических свойств уха.

Звук одной и той же интенсивности может вызвать у разных людей различные ощущения громкости. Так, ребенок воспринимает те же звуки более громкими, чем пожилой человек. Интенсивность ультразвука может быть очень велика, но создаваемая им громкость равна нулю.

Важным свойством уха является

адаптация, заключающаяся в том, что при повышении интенсивности звука чувствительность уха уменьшается. Свойство адаптации присуще всем органам чувств, поэтому любое ощущение (громкость звука, яркость света, степени запаха) растет не пропорционально приращению раздражения. Связь между ощущением и раздражением определяется законом Вебера-Фехнера, согласно которому: громкость некоторого звука пропорциональна логарифму отношения его интенсивности к порогу слышимости.

$$E = k \lg \frac{J}{J_0}$$

где E - громкость звука; k - коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты звука.

Шкала громкости и шкала уровня интенсивности не совместимы, т.к. ощущение громкости зависит от частоты. Однако считают, что на частоте 1 кГц числовые значения в децибелах уровня интенсивности и громкости одинаковы. Для отличия шкалы интенсивностей звука от шкалы громкости децибел громкости называют фоном. Для вычисления громкости в фотонах при частоте звука 1 кГц можно использовать формулы:

$$E_f = 10 \lg \frac{J}{J_0} \text{ или } E_f = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$

Громкость звука от источника

можно измерить методом сравнения звуков, издаваемых звуковым генератором. Меняя интенсивность звука генератора, можно добиться слухового ощущения звука. При

этом громкость исследуемого источника, измеряемая в фонах, будет равна уровню интенсивности звука, издаваемого генератором, в децибелах.

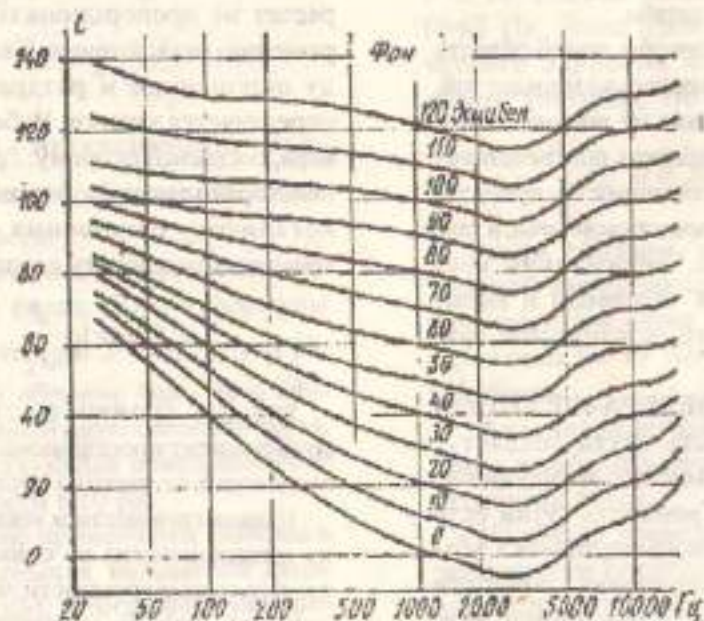


Рис.84

Экспериментальные исследования с большим количеством людей с нормальным слухом позволили получить кривые равной громкости для различных частот. (Рис.84)

Каждая кривая соответствует определенной громкости в фонах.

Интенсивность звука измеряют шумомерами. Шумомер превращает акустический сигнал в электрический и показывает значение интенсивности в децибелах.

Значение интенсивностей, акустическое давление и уровень интенсивности некоторых звуков представлены в таблице.

Характеристики звука	Интенсивность (Вт/м ²)	Давление (Па)	Уровень интенсивности (дБ)
1. Нижний порог слышимости.	10 ⁻¹²	2*10 ⁻⁵	0
2. Шелест травы. Сердечные тоны.	10 ⁻¹¹	6*10 ⁻⁵	10
3. Разговор шепотом.	10 ⁻¹⁰	2*10 ⁻⁴	20
4. Перелистывание страниц газеты.	10 ⁻⁹	6*10 ⁻⁴	30
5. Тихий разговор.	10 ⁻⁸	2*10 ⁻³	40
6. Разговор нормальным голосом.	10 ⁻⁷	6*10 ⁻³	50
7. Громкий разговор.	10 ⁻⁶	2*10 ⁻²	60
8. Шум на оживленной улице.	10 ⁻⁵	6*10 ⁻²	70
9. Звонок телефона.	10 ⁻⁴	2*10 ⁻¹	80
10. Шум от дизельного грузовика.	10 ⁻³	6*10 ⁻¹	90
11. Шум в кабине самолета.	10 ⁻²	2	100
12. Шум авиадвигателя самолета.	10 ⁻¹	6	110
13. Сильные раскаты грома.	1	20	120
14. Верхний порог слышимости.	10	60	130
15. Шум при взлете реактивного самолета	100	200	140
16. Шум космической ракеты.	10 ⁵	6*10 ³	170
17. Звук разрушающий металлические конструкции.	10 ⁷	6*10 ⁵	190

ВОПРОСЫ.

1. Что называется нижним порогом слышимости? Дайте определение болевого порога. 2. Почему человек не воспринимает звук с интенсивностью, меньшей порога слышимости? 3. Дайте определение уровня интенсивности. Почему вводит эту

величину? 4. Что называется белом и децибелом? 5. Сформулируйте закон Вебера-Фехнера. 6. Что называется уровнем громкости? 7. По графику рис.84 найдите уровень громкости, если шумомер зарегистрировал уровень интенсивности звука 75 дБ, при частоте 300 Гц.

УПРАЖНЕНИЕ 5

1. В верхний предел частоты звука, воспринимаемого летучей мышью, находится в области ультразвука и равен 150 кГц. Определите длину волны, соответствующей этому звуку.

2. Вычислите длину распространяющейся в артерии лошади пульсовой волны, если она создается сокращениями левого желудочка сердца, происходящими 45 раз в секунду, а скорость волны 10 м/с. Напишите уравнение пульсовой волны, если амплитуда волны А.

3. Интенсивность ультразвука, используемого для лечения заболеваний суставов у крупного рогатого скота, составляет $1,2 \cdot 10^4$ Вт/м². Какое количество энергии проходит в тело животного при длительности процедуры 5 мин, если площадь вибратора 10 см²?

4. На сколько децибел возрастает уровень интенсивности звука, если его интенсивность увеличится в 100 раз, в 1000 раз?

5. Яйценоскость кур резко снижается, если шум в птичнике достигает 100 дБ. Какова интенсивность звука и давление, соответствующее этому шуму?

6. Установленная на высоком столбе сирена создает на расстоянии 50 м от нее уровень интенсивности звука в 110 дБ. На каком расстоянии от сирены уровень интенсивности звука снизится до 60 дБ?

§ 16. Звукоизлучение в живом мире.

ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЕ ЧЛЕНИСТОНОГИХ. В процессе эволюции различные виды животных выработали способы испускания звуковых сигналов, которые удобны для внутривидового общения и для охоты. Органы звукоизлучения у животных весьма разнообразны. Голосовой аппарат имеется далеко не у всех представителей животного мира, и многие из них пользуются для испускания звука инструментальным способом. Насекомые для испускания звука применяют различные органы, несущие помимо звукоизлучения, другие функциональные нагрузки (крылья, ноги и т.п.).

Членистоногие издают звуковые сигналы трением или ударами одних органов о другие, вибрацией

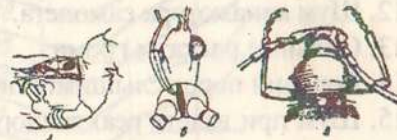


Рис.85

мембран, пропусканием воздуха через отверстие. Так, крабы издают звуки трением одной ноги о другую или о панцирь. У кузнечика на внутренней поверхности одного надкрылья находится зазубренная жилка, которая при смыкании и размыкании надкрылий трется о внутренний край другого надкрылья. Хорошо известны звуки, возникающие при вибрациях крыльев, мух, пчел. Ударные механизмы используются некоторыми

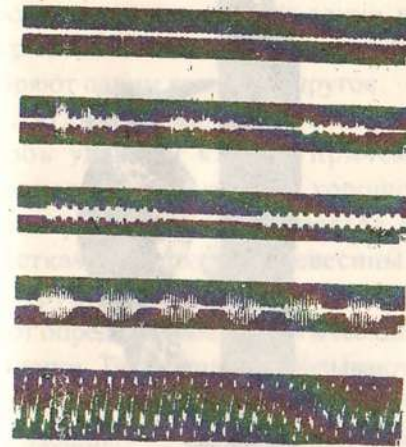


Рис.86

видами муравьев, пауков, жуков. Особенно громкие звуки издают жуки-точильщики, которые, ударя головой о стенки ходов, сделанных ими в древесине, вызывают звуки, напоминающие тиканье часов.

Большинство звуков, издаваемых членистоногими, состоят из следующих друг за другом импульсов, возникающих при однократном срабатывании соответствующего органа (надкрылья, крыла и т.п.), и имеют сложные акустические спектры, характерные для шумов. Звуки эти, как правило, высокочастотные и часто лежат в ультразвуковом диапазоне.

ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЕ РЫБ. Рыбы значительную часть звуков издают при движении в результате срыва водяных вихрей с повер-

хности их тела. Звуки движения особенно интенсивны у рыб, тело которых плохо обтекаемо, и спектр этих звуков имеет шумовой характер. Тем не менее, каждый вид рыб издает при движении характерные для него звуки. Так, ставрида издает звуки, напоминающие хруст, лещ - хрип, морской карась - щелчки.

Специфические звуки издаются рыбами при захвате пищи. Хищные рыбы (судак, щука, акула) заглатывают добычу целиком, без пережевывания. Захват добычи сопровождается резкими щелчками. Другие виды рыб (окуневые, ставридовые, кефалевые) предварительно перетирают пищу, и при этом возникают звуки от трения зубов, имеющие шумовой характер и воспринимающиеся, как скрежет.

Своеобразным звукоизлучательным органом рыб является плавательный пузырь, образованный тонкой упругой мембраной, внутри которой находится некоторый объем

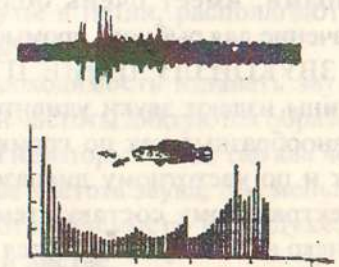


Рис.87

воздуха. Если к пузырю приложить кратковременную силу (удар, толчок), то он приходит в колебательное движение и излучает в воду звуковые волны. Для приведения плавательного пузыря в колебательное движение рыбы используют расположенные по их бокам барабанные мышцы. В зависимости от строения плавательного пузыря и барабанной мышцы, голоса рыб могут быть весьма разнообразными. Они могут напоминать барабанную дробь (японский ерш), карканье, хрюканье и даже давать чистые тоны.

Акустическая активность рыб зависит от времени года и суток и от вида рыб. Некоторые виды наиболее «разговорчивы» утром, другие днем или ночью. Особенно усиливается акустическая активность в брачный период. Установлено, что издаваемые рыбами звуки играют значительную роль в стимулировании и синхронизации половой активности. Характерные звуки издаются так же рыбами при охоте, спасении от хищников, при миграциях.

Изучение звуков, издаваемых рыбами, имеет очень большое значение для рыбного промысла.

ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЕ ПТИЦ.
Птицы издают звуки удивительно разнообразные как по громкости, так и по частотному диапазону и спектральному составу (тембру), однако не все звуки издаются голо-



Рис.88

совым аппаратом. Многие безголосые птицы обладают «инструментальным» голосом, а производстве которого принимают участие клюв, лапы и крылья.

Так же, как и движение рыб, полет птиц сопровождается определенными звуками, по которым, например, многие птицы распознают приближение пернатых хищников. Лишь только у некоторых видов птиц (совы) специальные приспособления гасят создающие звуки воздушные вихри, и эти птицы летают почти бесшумно.

Издаваемые птицами инструментальные звуки весьма разно-

образны. Так, аисты издают щелкающие звуки при открывании и закрывании клюва. Голуби в полете ударяют одним крылом о другое.

Дятлы создают барабанную дробь ударами клюва, причем специально отыскивают хорошо резонирующие сорта деревьев с участками высушенной древесины. Инструментальные звуки выполняют определенные биологические функции. Так, цыплята призывают наседку ударами клювиков о доску, а барабанная дробь дятла является брачным сигналом.

Однако основную роль в качестве сигнала общения играет у птиц дыхательный голос, источником которого является нижняя гортань, расположенная в месте разветвления трахеи на бронхи. Гортань представляет собой механикоакустический преобразователь, в котором часть кинетической энергии протекающего потока воздуха преобразуется в энергию звуковой волны.

Не вдаваясь в подробности довольно сложного устройства гортани, рассмотрим лишь ее приблизительную схему. (Рис. 89) В гортани имеются две мембраны - внешняя и внутренняя голосовые перепонки. Действие гортани основано на законе Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + P = const$$

При быстром прохождении



Рис.89

струи воздуха в гортани, давление между голосовыми перепонками падает, они сходятся и закрывают щель между ними. Скорость потока падает до нуля, статическое давление возрастает, раздвигает перепонки, и процесс повторяется, в результате чего возникает пульсация воздушной струи, поражающей звуковую волну. Специальные мышцы могут изменять натяжение перепонки и ширину просвета в бронхах, что влияет на частоту и амплитуду звуковых колебаний.

Для увеличения громкости испускаемого сигнала необходим резонатор. Так как чем больше длина трубы, тем ниже частота испускаемого звука, то у некоторых птиц (куриные, журавли) трахеи настолько длинные, что, будучи свернуты в петли, располагаются под легкими и под кожей.

Необходимость издавать звуки низкой частоты диктуется образом жизни некоторых птиц, так как чем меньше частота звука, тем меньше его поглощаемость в воздухе, в траве и листьях.

Звуки, издаваемые птицами, лежат в основном в диапазоне 0,2-12 кГц, однако некоторые птицы могут издавать звуки, находящиеся в области ультразвука (до 30 и даже до 50 кГц). Крупные птицы, как правило, обладают более низкими голосами (до 1 кГц), а голоса мелких птиц находятся в высокочастотной области. Интенсивность птичьих голосов бывает очень велика. Так, пение канарейки заглушает голос человека, хотя масса канарейки в 1000 раз меньше массы человека.

Интересно отметить, что голоса различных видов птиц имеют различные частоты основных тонов и находятся в разных участках спектра и поэтому не создают взаимных помех, что имеет большое экологическое значение. Так, сигналы опасности, которые используются воробьиными, находятся в высокочастотной области спектра и почти не воспринимаются пернатыми хищниками, у которых испускание и восприятие звуков связано с низкими частотами. На рис.90 представлены звуковые спектры опасности некоторых птиц.

Использование для внутривидовой сигнализации определенного частотного диапазона не означает, что голосовой аппарат данного вида птиц не может использовать другие частоты. Некоторые птицы (попугаи, вороны), как известно, в состоянии даже имитировать чело-

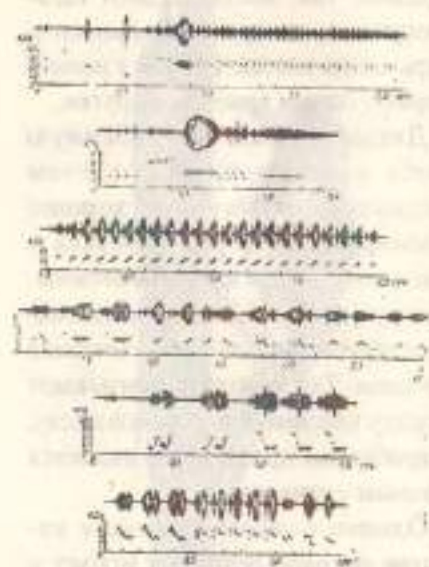


Рис.90

веческую речь. Акустические сигналы (крики, воркование, карканье) несут с собой значительную информацию (призыв, сигналы угрозы, бедствие, брачные сигналы) и играют очень большую роль в жизни птиц.

ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИХ. Млекопитающие, как и другие виды животных, могут издавать инструментальные звуки. Так, зайцы передают друг другу информацию стуком лап по земле или по деревьям; обезьяны хлопают ладонями, динобразы трещат иглами и т.д. Однако основную роль в общении между млекопитающими играют голосовые звуки.

Источником звука у млекопитающих является верхняя гортань, находящаяся в верхней части трахеи.

Роль резонаторов выполняют гортанные мешки, ротовая полость, носовая полость (хобот слона) и даже легкие. У некоторых животных истечение воздушной струи происходит плавно и возникают длительные звуки постоянной частоты (мычание коровы, вой волков). Но у большинства животных звуки модулируются по частоте и по амплитуде изменением размеров голосовой щели голосовыми связками, движениями языка, губ, изменением формы ротовой полости.

Звуки, издаваемые млекопитающими, в высшей степени разнообразны. Они могут представлять собой не голосовые шумы (т.е. шумы, издаваемые без участия гортани, - сопенье, фырканье), а одиночные звуки (редкий лай собак, лисец), двуслоговые звуки (мяуканье кошек) и т.п. Характер сигнализации и спектральный состав звуков усложняется в связи с развитием мозга. Различные виды животных в состоянии испускать звуки в пределах частот от нескольких герц до сотен килогерц.

Водные млекопитающие - китообразные - имеют голосовой аппарат, хорошо приспособленный для создания звуков в воде, хотя принципиально гортань китооб-



Рис.91

разных почти не отличается от гортани наземных млекопитающих. Например, у белуги перепонка в задней части гортани образует множество складок, в гортани имеются специальные карманы и мешочки. Все это позволяет белуге модулировать издаваемую ею звуковую волну и испускать самые разнообразные звуки, столь сильные, что их слышно даже, если животное находится под водой.

Как было установлено учеными, звуковая сигнализация играет весьма значительную роль среди морских животных и рыб. Так, стая дельфинов, преследующая косяк скумбрии, ведет себя аналогично стае собак: при погоне они издают звуки, напоминающие лай, затем, догнав косяк, они переходят на высокочастотные свисты, приводящие скумбрию в панику. Косяк теряет ориентировку, и рыбы собираются в кучу, после чего дельфины

со звуками, напоминающими мяуканье, начинают расправляться с добычей.

ВОПРОСЫ.

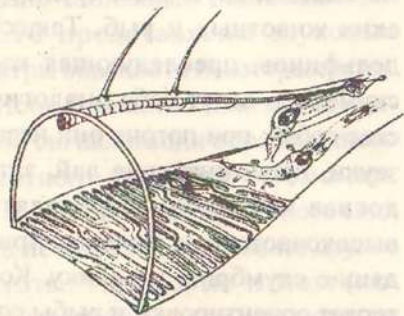
1. Какими способами членистоногие издают звуковую волну? Что представляет собой звуковой сектор членистоногих? 2. Объясните способы создания звука рыбами? Почему принято считать, что рыба в воде

молчит? 3. Каков физиологический механизм получения звука у птиц? Каковы особенности звукоизлучения певчих птиц? 4. Объясните процесс усиления звука млекопитающими. Почему некоторые млекопитающие могут издавать не только звуки, но и слоги? 5. Почему люди обладают столь большими возможностями звукоизлучения по сравнению с остальными млекопитающими?

§ 17. Восприятие звука живыми существами.

ОРГАНЫ СЛУХА ПРОСТЕЙШИХ. Для восприятия звуковых колебаний у большинства животных имеются специальные органы. Только простейшие представители животного мира ощущают звуковые колебания по изменению давления среды на все тело в целом.

Самым примитивным слуховым органом является трихонидная сенсилла у насекомых. Это волосок длиной 100-500 мкм, один конец которого соединен с нейроном, создающим нервный импульс при



колебаниях волоска в звуковом поле (Рис.92).

Более сложное устройство имеют тимпанальные слуховые рецепторы у кузнечиков, клопов, бабочек (Рис.93). Строение таких органов довольно сильно различается даже в пределах одного семейства. Так, у кузнечиков они находятся в голених передних ног, на которых расположены две мембраны. К мембранам изнутри примыкают сенсиллы. Звуковая волна приводит в движение мембраны, а те в свою очередь, воздействуют на сенсиллы, вызывающие нервные импульсы в нейронах. Различные группы сенсилл реагируют на звуки различных частот.

Звукочувствительные волоски, аналогично сенсиллам, лежат в основе звуковоспринимающих органов у других простейших живых существ, однако у большинства из них имеются устройства для усиления и анализа звука. У простейших такого анализатора нет.

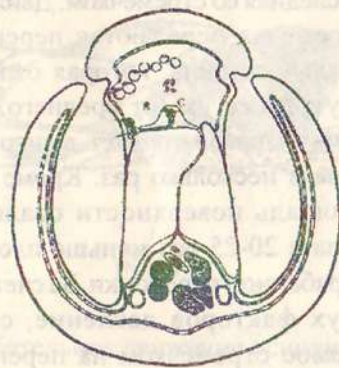


Рис.93

ОРГАН СЛУХА У МЛЕКОПИТАЮЩИХ. Ухо млекопитающих состоит из трех основных частей - наружного, среднего и

внутреннего уха. Наружное ухо состоит из ушной раковины и наружного слухового прохода. Ушная раковина играет роль звукоулавливателя, концентрирующего звуковые волны на слуховом проходе, в результате чего звуковое давление на барабанную перепонку увеличивается по сравнению с давлением во внешнем акустическом поле. Кроме того, ушная раковина служит для пространственной ориентации относительно источника звука. Для направления ушной раковины в ту или другую сторону к ней подходят специальные мышцы. Люди утратили способность двигать ушами, но у многих животных ушные мышцы развиты весьма сильно.

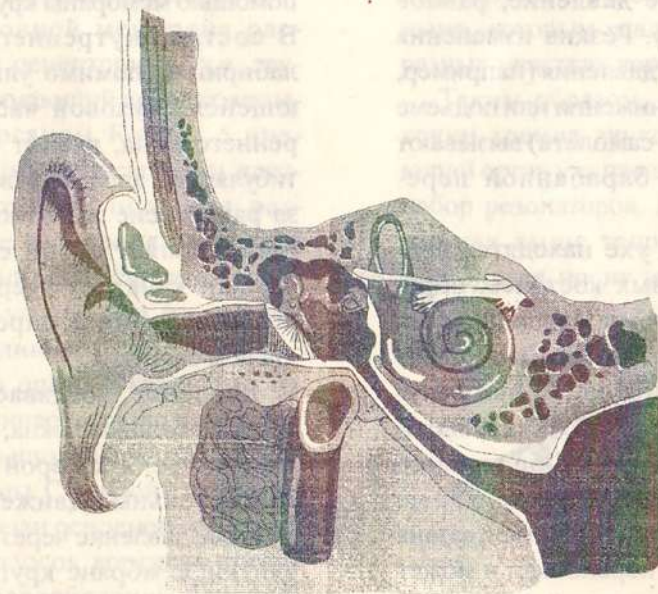


Рис.94

Среднее ухо представляет собой своеобразный барабан, который отделяется от наружного уха барабанной перепонкой толщиной 0,1-0,2 мм. Барабанная перепонка представляет собой воронкообразную мембрану, вдавленную внутрь среднего уха, с неравномерно натянутыми волокнами. Такое строение барабанной перепонки обеспечивает практическое отсутствие ее собственных колебаний и их быстрое затухание, что весьма существенно, так как собственные колебания перепонки создавали бы шумовой фон, который мешал бы животному слышать внешние звуки.

Среднее ухо сообщается с носоглоткой с помощью евстахиевой трубы, позволяющей поддерживать в среднем ухе давление, равное атмосферному. Резкие изменения атмосферного давления (например, при быстром снижении или подъеме внутри салона самолета) вызывают вдавливание барабанной перепонки.

В среднем ухе находятся несколько слуховых косточек, образующих систему рычагов, соединенных суставами. В соответствии со своей формой они получили название молоточка, наковальни и стремечка. Общая масса слуховых косточек у человека 50 мг. Рукоятка молоточка жестко связана с мембранной перепонкой и может колебаться вместе с ней. Молоточек

шарнирно связан с наковальней, а последняя со стремечком. Движения стремечка передаются перепонке овального окна, которая отделяет внутреннее ухо от среднего. Система рычагов создает выигрыш в силе в несколько раз. Кроме того, площадь поверхности овального окна в 20-25 раз меньше площади барабанной перепонки. За счет этих двух факторов давление, создаваемое стремечком на перепонку овального окна, в 60-70 раз больше, чем давление звуковой волны на барабанную перепонку. Это весьма существенно, так как перепонка овального окна должна создавать колебания жидкости (эндолимфы), заполняющей улитку внутреннего уха. Компенсация изменений давления в улитке производится с помощью мембраны круглого окна. В состав внутреннего уха или лабиринта, помимо улитки, являющейся слуховой частью внутреннего окна, входит также вестибулярный аппарат, ответственный за равновесие животного. Улитка представляет собой спиралеобразный канал из твердой части костной ткани с определенным числом завитков.

Давление, создаваемое перепонкой овального окна, передается эндолимфе, в которой создаются колебательные движения, передающие давление через весь объем улитки мембране круглого окна. Движение эндолимфы приводит в



Рис.95

колебательное движение основную мембрану, и на ней возникает бегущая волна, максимумы смещений которой находятся в разных участках мембраны в зависимости от частоты колебаний. При звуках низкой частоты максимумы находятся на дальнем конце мембраны, а при высокочастотных звуках - на участках мембраны, расположенных ближе к овальному окну.

На основной мембране располагается рецепторный, т.е. звуковоспринимающий аппарат, называемый органом Корти, с чувствительными волосковыми клетками, к которым подходят разветвленные окончания слухового нерва. Длина волосков различна. В основании улитки они короче, а у вершины длиннее.

Кортиев орган в какой-то степени напоминает струнную систему рояля с большим количеством струн разной длины. С длиной структуры у рояля связан основной тон звука. Каждый волосок кортиева органа является своеобразной струной,

настроенной на определенный тон.

Над основной мембраной расположена покровная мембрана, к которой прикасаются кончики волосковых клеток. При колебаниях основной мембраны, вызывающих резонансные колебания волосков, происходит деформация волосков. Если колебания превышают определенную пороговую величину, то в волокнах слухового нерва возникают биопотенциалы действия.

Нервные импульсы передаются по слуховому нерву в соответствующий участок коры головного мозга, и в нем возникает субъективное ощущение звука. При повреждениях отдельных участков «струнной системы» кортиева органа животное перестает слышать определенные тоны. Это было подтверждено в опытах над животными, которым удаляли волокна в разных участках кортиева органа.

Таким образом, с физической точки зрения звуковоспринимающий орган уха представляет собой набор резонаторов. Поэтому изложенная выше теория слухового восприятия носит название резонансной.

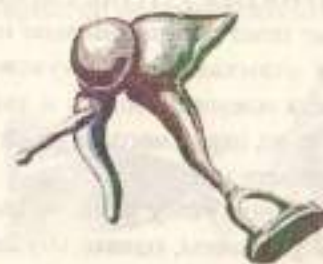


Рис.96

нансная теория Гельмгольца.

Следует добавить, что восприятие звука возможно даже при повреждениях барабанной перепонки и системы среднего уха.

Кость хорошо проводит звук, и распространяющаяся звуковая волна в ней может привести в колебательное движение основную мембрану и «струнную систему» кортиева органа. Поэтому если Кортиев орган не поврежден, то глухие могут, хотя и слабо, слышать громкую музыку и другие звуки, передающиеся во внутреннее ухо через костную систему скелета. Известно, например, что Бетховен, будучи глухим, слушал игру на рояле, держа в зубах конец трости, другой конец которой он прислонял к роялю. Этим явлением пользуются при конструировании слуховых аппаратов, в которых колебания воздуха усиливаются микрофоном и электрическим усилителем, преобразуются в механические колебания слухового устройства, затем передаются внутреннему уху через кости черепа.

ОСОБЕННОСТИ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ У ПТИЦ. Слуховой аппарат птиц принципиально немногим отличается от слухового аппарата млекопитающих и также состоит из наружного, среднего и внутреннего уха.

Наружное ухо у птиц не имеет ушной раковины, однако слуховой проход в периферической части несколько расширен и образует



Рис.97

внутреннюю ушную раковину, представляющую собой резонатор. У водоплавающих птиц наружное ухо защищено несколькими слоями перьев (Рис.97).

Слуховые характеристики некоторых млекопитающих и птиц представлены в таблице. Среднее ухо у птиц, как и у млекопитающих, представляет собой барабан, ограниченный со стороны наружного уха выпуклой барабанной перепонкой, а с противоположной стороны - перепонками овального и круглого окна. Звукопередающая система, состоящая из слуховых хрящей и одной косточки, отличается от такой же системы млекопитающих, но выполняет те же функции, т.е. передает колебания от барабанной перепонки к перепонке овального окна.

Класс	Вид	Верхний предел частоты (Гц)	Область максимальной чувствительности (кГц)	
Млекопитающие	Человек	20	1-3	
	Шимпанзе	30	0,1-6	
	Собака	60	0,2-15	
	Лиса	65	0,1-6	
	Медведь	80	0,3-30	
	Кошка	100	0,25-35	
	Дельфин	100	15-70	
	Летучая мышь	150	100	
	Птицы	Кряква	8	2-3
		Сокол	10	3
Сизый голубь		12	1-2	
Куры-несушки		12	0,8-2	
Ушастая сова		18	4-5	
Сорока		21	2	
Зяблик		29	2-3	

ОСОБЕННОСТИ СЛУХОВОГО АППАРАТА РЫБ. Рыбы имеют два типа звуковоспринимающих органов. Один из них реагирует на смещения частиц воды, происходящие под действием звукового поля. Эти органы находятся на боковой линии рыбы и у некоторых рыб могут реагировать на смещения в 2-2,5 нм. Аналогичным образом воспринимают интенсивные звуковые колебания рецепторы, находящиеся на коже рыбы, на наружной жаберной крышке. Другие органы являются рецепторами давления и связаны с плавательным пузырем. Рецепторы боковой линии (невромасты) представляют собой

студенистые тельца, в которые входят волоски, соединенные с мембраной и имеющие на другом конце нервные волокна, создающие импульсы, поступающие в слуховой центр мозга.

Строение уха у рыб значительно отличается от уха млекопитающих. Во внутреннем ухе также имеется лабиринт со звуковоспринимающими

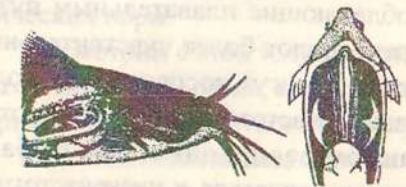


Рис.98

клетками. Приемниками звуковых волн являются так называемые лагена и саккулос, из которых, по мнению биологов, развились в процессе эволюции слуховые органы наземных животных - среднее и наружное ухо. Слуховая раковина у рыб отсутствует, так как она создавала бы дополнительное сопротивление при движении рыбы в воде. Отсутствует также барабанная перепонка, так как в среде с большой плотностью она не смогла бы быть таким же чувствительным приемником звуковых колебаний, как в воздухе. Интересно, что у животных, вернувшихся к водному образу жизни (у дельфинов и моржей), также отсутствует наружное и среднее ухо, хотя и можно обнаружить их рудиментарные остатки.

Роль среднего уха выполняет плавательный пузырь, который соединяется с внутренним ухом с помощью так называемого веберова аппарата, состоящего из четырех пар слуховых косточек. Плавательный пузырь представляет собой хороший резонатор и служит усилителем звуковых колебаний, доходящих до него из водной среды через тело рыбы. Поэтому рыбы, обладающие плавательным пузырем, имеют более чувствительный слух и могут воспринимать более высокочастотные колебания, хотя в целом воспринимаемые рыбами звуки находятся в низкочастотном диапазоне.

Резонансная теория Гельмгольца, как и некоторые другие теории звукового восприятия, пока что не в состоянии с абсолютной достоверностью объяснить механизм трансформации энергии звуковых колебаний во внутреннем ухе в энергию нервного импульса. Неясно также, с физической точки зрения, исключительная чувствительность уха, которое на пороге слышимости реагирует на смещения молекул воздуха в звуковой волне всего в 10^{-11} м, что составляет примерно 0,2 диаметра атома водорода. Эта чувствительность предельная, так как если бы она была хотя бы в 10 раз больше, то ухо воспринимало бы тепловое движение молекул как шум, который заглушал бы нужные для животного звуки. При столь малых смещениях энергия колебательного движения барабанной перепонки настолько ничтожна, что непонятно, как она может привести в движение сравнительно массивный аппарат среднего и внутреннего уха. В связи с этим высказывается предположение, что колебания барабанной перепонки служат всего лишь каким-то механизмом, который включает существующие в ухе внутренние, пока еще неизвестные нам источники энергии.

ВОПРОСЫ.

1. Объясните механизм звуковосприятия простейшими живыми организмами.
2. Каково функциональное назначение наруж-

ного, среднего и внутреннего уха млекопитающих? 3. В чем суть теории звуковосприятия Гельмгольца? 4. Объясните роль плавательного пузыря в звуковосприятии у

рыб. 5. Чем звуковоспринимающий аппарат птиц отличается от аналогичного аппарата млекопитающих?

§ 18. Влияние шума на живой организм.

ИСТОЧНИКИ ШУМА. Шумом в акустике считается звук, обладающий сложным негармоническим или непрерывным спектром. Шумом можно считать любые звуки, затрудняющие правильное восприятие речи, музыки и различных звуковых сигналов, а также раздражающие нервную систему человека или животных и вызывающие соответствующие нарушения нормального функционирования организма.

Вредное действие шума на человека было замечено очень давно. Еще римский сатирик Ювенал писал, что в Риме сну мешают скрип и грохот телег на улицах. В ряде городов древнего Рима существовали законы, запрещающие шуметь в ночное время.

Развитие техники приводило к увеличению уровня шума, и в XX

веке он стал одним из опаснейших факторов, влияющих на здоровье человека и животных. Сейчас практически невозможно найти область техники, быта, где не присутствовали бы звуки, вызывающие нежелательные психологические или физиологические реакции. Поэтому изучением и профилактикой действия шума занимаются в настоящее время ученые самых различных специальностей - врачи, психологи, физиологи, физики, биофизики и даже юристы, разрабатывающие основы акустического законодательства.

Многочисленными экспериментами показано, что для нормального сна или для нормальной умственной деятельности окружающей шум не должен превышать 10-20 дБ, а оптимальные условия для других видов работ требуют шумового фона 40-50 дБ. Эти данные положены в основу разработанных гигиенистами санитарных акустических норм.

Рассмотрим с этой точки зрения различные виды шума, с которыми приходится сталкиваться человеку.

Если еще полвека назад дневной шум на центральных магистралях крупных городов не превышал в



Рис. 99

среднем 60 дБ, то теперь он достигает в среднем 85 дБ, а максимальное значение доходит до 115 дБ. Санитарные нормы устанавливают предел ночного шума на

улицах до 40 дБ, однако на магистралях крупных городов он не бывает ниже 70 дБ. Уровня в 90-100 дБ достигает шум в жилых помещениях вблизи аэропортов.



Рис. 100

Со значительными шумами сталкивается человек на производстве и в быту. Так, ткацкий станок производит шум в 100-105 дБ, токарный станок - 90-95 дБ, в трамвае и в автобусе шум достигает 85-90 дБ, в вагоне метро - 95 дБ. Электропылесос создает шум примерно в 80 дБ и даже электробритва - в 60-65 дБ, не говоря уже о радиоприемниках и телевизорах (до 110 дБ) и об электромузыкальных инструментах (до 120-130 дБ).

Очень велики шумы в производственных комплексах. Например, электродойка создает шум до 120 дБ. Большие шумы возникают также при значительных концентрациях животных в комплексах. Так, шум на птицефабриках, усредненный по всем частотам, достигает 90 дБ.

В настоящее время человечество осознало опасность возрастания шумового фона на нашей планете. В последние годы учеными и инженерами проводится много мероприятий по уменьшению шума, создаваемого техническими установками, которые снабжаются менее шумящими двигателями, амортизаторами, закрытыми кабинами для водителей и т.п. Стронтелями начинают применяться звукопоглощающие материалы, позволяющие снижать шум в жилых и производственных помещениях, а также в помещениях для работы с животными. В шумных цехах пер-

соналу выдаются индивидуальные ушные протекторы, снижающие шум на 10-20 дБ.

Однако, несмотря на это, шум продолжает неуклонно возрастать. Еще в начале нашего столетия Роберт Кох предсказывал, что наступит время, когда человечество будет вынуждено бороться с шумом так же, как оно борется с эпидемиями холеры и чумы. В конце XX века это высказывание Коха приобрело исключительную актуальность, и борьба с шумом становится общечеловеческой задачей.

ВЛИЯНИЕ ШУМА НА ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ. К сожалению, иногда еще бытует мнение, что к шуму можно привыкнуть, выработать «шумовой иммунитет», и обосновывается это мнение тем, что есть люди, которые могут готовить уроки под звуки телевизора или спать, когда под окном работает трактор. Определенную привычку, действительно, можно приобрести, однако даже у людей, «привычных» к шуму, возникают в организме нарушения физиологических функций, дающие себя знать по прошествии некоторого времени.

Говоря о действии шума на человека и животных, следует иметь в виду, что вредное действие производят лишь шумы, уровень интенсивности которых превосходит определенный предел. Слабые шумы природного происхождения не только не вредны, но даже

благотворно влияют на человеческий организм. Полное отсутствие шума, тишина, которая создается в сурдокамерах при тренировках космонавтов, тяжело влияет на психическое состояние человека. Он начинает слышать удары сердца, пульса, шорох ресниц, и у нетренированных людей это приводит к психическим расстройствам. Некоторые звуки, такие, как слабый шум морского прибоя, шум леса, дождя и т.п. положительно влияют на нервную систему. В настоящее время такие шумы, записанные на магнитофонную пленку, проигрывают в больничных и санаторных палатах, что приводит к успешному лечению бессонницы и других нервно-психических заболеваний.

Интенсивные шумы прежде всего отрицательно сказываются на работе органов слуха, приводя к повреждению волосковых клеток органа Корти, причем первыми

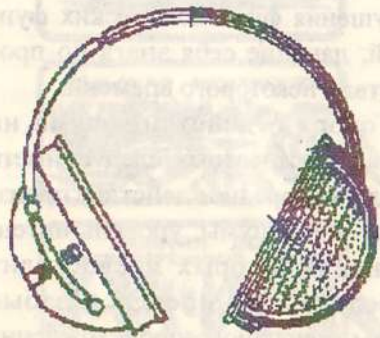


Рис.101

повреждаются клетки, реагирующие на высокочастотные звуки. Даже при кратковременном действии низкочастотного шума в 110 дБ порог слуховой чувствительности снижается на 12-15 дБ. Значительное снижение слуховой чувствительности наблюдается, например, у трактористов в конце рабочего дня. Если действие шума кратковременно, то порог слуховой чувствительности восстанавливается, но при длительном действии шума изменения в слуховом аппарате становятся необратимыми, так как поврежденные волосковые клетки не восстанавливаются.

Однако действие шума не ограничивается нарушением работы слухового аппарата, поскольку слуховой анализатор через кору головного мозга оказывает влияние на работу других органов и систем человека или животного.

Сильно влияет шум на состояние нервной системы. У людей, работающих в шумных цехах, наблюдается быстрая утомляемость, бессонница, раздражительность, дрожание пальцев рук и т.п. Статистическое обследование, проведенное в психиатрических больницах, показало, что из всех психических больных 20% лишились рассудка вследствие действия шума.

Интенсивный шум вызывает изменения в циркуляции крови и в работе сердца, приводит к ускорению реакции оседания эритро-

цитов, повышению содержания холестерина в крови. Нарушается работа органов внутренней секреции. В частности, изменяется процесс отделения и состав желудочного сока, что при длительном воздействии шума приводит к серьезным заболеваниям. Под действием интенсивного шума нарушается координация движений и равновесия тела, поскольку орган равновесия находится в непосредственной близости со звуковоспринимающим органом.

Шум изменяет тонус мышц и уменьшает эластичность кровеносных сосудов, что является причиной сердечно-сосудистых заболеваний. Обследование рабочих, условия труда которых связаны с высокочастотным шумом в 95 дБ, показали, что у них случаев заболевания гипертонией в 2 раза

больше, чем у рабочих нешумных профессий.

Шум снижает физическую и умственную активность человека и поэтому непосредственно оказывает влияние на производительность труда. Статистика показывает, что действие систематического шума на промышленных предприятиях снижает производительность труда до 60%, а сильный шум в конторских помещениях приводит к увеличению ошибок в расчетах до 50%. Вместе с тем, снижение уровня шума приводит к значительному повышению производительности труда, что было показано на многих заводах при замене машинного парка на более современный и менее шумный.

Влияние шума различной интенсивности на человека можно проиллюстрировать следующей схемой:

L, (дБ):	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	раздражающее действие												
	снижение производительности труда												
	шумовая травма.												

Следует отметить, что эта схема приближенная, так как вредное действие шума зависит не только от его интенсивности, но и частоты. В связи с этим шумы принято подразделять на низкочастотные (до 300 Гц), среднечастотный (300-800 Гц) и высокочастотные (более 800 Гц). Особенно вредное действие производит высокочастотный шум.

Исследования, проведенные на птицефабрике, показали, что особо неблагоприятное действие оказывает на кур-несушек шум при уровне 90-110 дБ и частоте 2-5 кГц. Он вызывает резко выраженные изменения в физиологическом состоянии кур: снижается температура конечностей и гребня на 3 С°, живая масса кур уменьшается



Рис. 102

до 6%, а яйценоскость до 20%. При уменьшении уровня шума на 10 дБ по сравнению с тем, который имеет

§ 19. Биофизика инфразвука.

ИСТОЧНИКИ ИНФРАЗВУКА И ЕГО СВОЙСТВА. К инфразвукам (ИЗ) относят механические колебания и волны с частотами ниже диапазона частот, слышимых человеком. За верхнюю границу ИЗ обычно принимают 16-25 Гц. Нижняя граница не определена. Практический интерес могут представлять колебания в несколько герц

место при обычных условиях на птицефабрике, яйценоскость возрастала на 5-8% и падеж уменьшался на 0,4%.

Приведенные примеры показывают, что действие шума не связано с субъективными ощущениями человека или животного, шум вызывает вполне объективные явления. Поэтому борьба с шумом вышла за пределы лабораторных исследований и стала важнейшей экологической проблемой нашего времени.

ВОПРОСЫ:

1. Чем отличается шум от тонового звука? 2. Приведите примеры уровня громкости, создаваемой промышленными установками. 3. Каким образом решается проблема регулирования уровня громкости шума на производстве, в быту, на транспорте? 4. Оказывает ли шум благоприятное воздействие на человека? 5. На какие системы организма оказывает влияние шум? 6. Каковы последствия влияния шума на живой организм?

и даже в десятые доли герца.

Источником инфразвука может быть любое тело, колеблющееся с соответствующей частотой.

Поскольку частота собственных колебаний уменьшается с увеличением размеров тела, то обычно инфразвуки возникают при колебаниях, а также при быстрых перемещениях тел, имеющих большие

поверхности. Они создаются, например, при резком открывании и закрывании дверей, при ударе по натянутому полотну и т.п. В природе источниками ИЗ-колебаний являются грозовые разряды, циклоны, обвалы, взрывы, землетрясения. Все такие источники инфразвука создают, как правило, несинусоидальные или импульсные затухающие колебания.

Генераторами незатухающих ИЗ-колебаний служат устройства, напоминающие органные трубы или свистки. Если труба открыта с одного конца, то ее длина равна четверти длины установившейся в ней стоячей волны. Поскольку длина волны инфразвука велика, то и размеры трубы генератора должны быть значительными. Например, для звука с частотой 16 Гц длина волны $\lambda = 330/16 = 20$ м. Поэтому длина полуоткрытой трубы генератора должна быть не менее 5 метров. Мощность таких генераторов зависит от мощности потока воздуха, падающего на вход трубы, и от ее диаметра, так как чем больше диаметр трубы, тем больше ее излучающая поверхность.

Свистки и трубы позволяют получать довольно значительные акустические мощности. Так, через миллисекунды свисток человек в состоянии продувать в секунду до 2 л воздуха, на что требуется мощность примерно в 4 Вт. Считаю к.п.д. свистка 25%, получаем акусти-

ческую мощность 1 Вт. Такой звук в комнате вызывает болевые ощущения.

Инфразвуковой «свисток», изготовленный в лаборатории французского ученого Гавро, имел диаметр 1,5 м и максимальную мощность 2 кВт. При работе такого генератора даже при неполной его мощности в стенах помещения появлялись трещины. Включить его на полную мощность было опасно, так как инфразвук мог разрушить здание, в котором находилась лаборатория.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНФРАЗВУКА. Инфразвуки распространяются на очень большие расстояния, так как коэффициент поглощения звука уменьшается с возрастанием длины волны. Инфразвук с частотой 3 Гц, создаваемый источником мощностью в 1 Вт, можно обнаружить на расстоянии до ста километров. Инфразвук от мощного ядерного взрыва обегает весь земной шар. Обладая большой длиной волны, он хорошо огибает препятствия (деревья, здания и т.п.). Кроме того, он приводит в резонансные колебания твердые тела больших размеров (стены домов, двери), которые сами становятся источниками инфразвука. Все это увеличивает проникающую способность инфразвука, и от него практически нет защиты.

Обычные микрофоны для регистрации звука непригодны из за

своих малых размеров. В самом деле, инфразвук, имеющий длину волны в несколько метров, испытывает дифракцию на микрофонах, диаметры которых не превышают нескольких сантиметров. Кроме того, низкочастотные колебания при обычных мощностях имеют большие амплитуды (до нескольких миллиметров). Мембраны обычных микрофонов на такие амплитуды не рассчитаны.

Инфразвук не воспринимается человеческим ухом по той причине, что вызываемые им колебания барабанной перепонки слишком медленны, и лимфатическая жидкость в улитке, будучи сдавлена со стороны овального окна, успевает в течение периода выровнять давление выпячиванием круглого окна. Поэтому инфразвук не вызывает колебаний волокон основной мембраны, связанной с окончаниями слухового нерва.

Научный подход к изучению инфразвука был положен академиком В.В.Шулейкиным, который в 1932 г., плывая на гидрологическом судне «Таймыр» в Черном море, проводит метеорологические исследования с помощью воздушных шаров-зондов, наполненных водородом. Академиком было замечено, что если приблизить такой шар (диаметром 65 см) к уху, то возникают болезненные ощущения вследствие значительных низкочастотных колебаний барабанной пере-

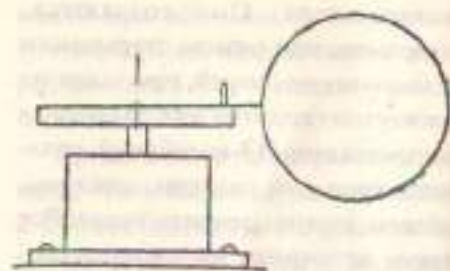


Рис. 103

понки (8-12 Гц). Такие же опыты, проводившиеся на берегу, адали от моря, к болезненным ощущениям не приводили. Ученый предположил, что это явление связано с воздействием на барабанную перепонку инфразвука, возникающего при движении ветра над гребнями морских волн и фокусируемых шаром, как своеобразной линзой, на барабанной перепонке. Когда воздушные массы, увлекаемые ветром, движутся над периодически расположенными гребнями волны, то возникают возмущения воздушного потока, образующие инфразвук. Явление это сходно с образованием звука при движении листа бумаги по зубцам гребенки.

Была получена формула, согласно которой интенсивность ИЗ пропорциональна квадрату скорости ветра и высоте гребней морских волн. Это означает, что наибольшая интенсивность инфразвука возникает там, где в данное время происходит шторм. Поскольку инфразвук мало поглощается в воздухе, то он сравнительно

быстро доходит до берега и является, таким образом, предвестником шторма.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИНФРАЗВУКА. Влиянию звука на человека и животных посвящено за последние годы много исследований. Однако имеющиеся на сегодняшний день сведения о биологическом действии инфразвука скудны и противоречивы.

В связи с тем, что ИЗ не воспринимается человеческим ухом, долгое время считалось, что он не оказывает биологического действия, и изучение его в этом направлении не велось.

Поводом, заставившим ученых заняться изучением биологического действия инфразвука, были наблюдения французского физика Гавро, руководителя лаборатории электроакустики в Марселе. Его сотрудники заметили, что в одном из корпусов лаборатории стало трудно работать. Достаточно было пробыть в этом здании 1-2 часа, чтобы люди почувствовали недомогание, снижалось внимание, возникали головные боли. Попытки объяснить эти явления воздействием магнитных полей, токов высокой частоты и другими причинами ничего не дали.

Однажды Гавро, приложив руку к стене лаборатории, почувствовал легкую вибрацию. Оказалось, что на соседнем с лабораторией заводе работал мощный вентилятор, создававший акустические волны с

частотой 7 Гц. Было высказано предположение, что именно эти волны и приводят к болезненным ощущениям. Справедливость этого предположения была доказана после того, когда Гавро изготовил ИЗ-генератор. При испытании этого генератора на себе, даже на неполную мощность, исследователь чувствовал себя очень плохо. Возникло ощущение сильной боли в животе, а после выключения генератора нормальное состояние наступало не сразу.

Было высказано предположение, что ИЗ вызывает нарушения в вестибулярном аппарате внутреннего уха. Область собственных частот отдельных участков внутреннего уха лежит в пределах от 2 до 20 Гц, и под действием инфразвука они приходят в резонансные колебания, нарушающие их нормальную деятельность. Наблюдения Гавро и опросы людей, работавших на площадках запусков ракет в США, двигатели которых создавали мощные ИЗ-колебания, подтвердили это предположение.

Наблюдения над добровольцами, проводившиеся английским ученым Худом путем записи биотоков глазных мышц, которые регистрировались специальными электродами, показали, что при облучении инфразвуком в 130 дБ возникают такие же изменения биотоков, какие имеют место при потере человеком чувства равновесия. Ощущения

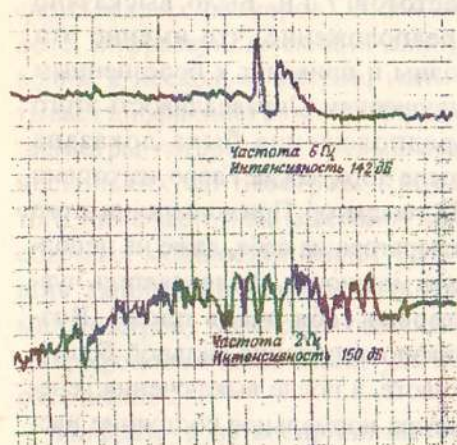


Рис.104

испытуемых при облучении инфразвуком аналогичны ощущениям космонавтов при потере чувства равновесия в невесомости (непроизвольное вращение глазных яблок, тошнота, головокружение) (Рис.104).

Помимо воздействия на органы равновесия вредное действие инфразвука объясняется еще и тем, что он вызывает вынужденные колебания различных колебательных систем в организме. Каждый орган в отдельности обладает той или иной частотой собственных колебаний. Некоторые из органов, такие, как печень, почки и др., сами по себе не совершают колебательных движений, но под действием внешней периодической силы могут придти в резонансные колебания, в результате чего возникает трение между отдельными органами, что

ведет к болезненным ощущениям. Частоты собственных колебаний внутренних органов, как правило, находятся в области нескольких герц.

Особенно вредно воздействие инфразвука на такую колебательную систему, какую представляет собой сердце с кровеносными сосудами. В инфразвуковом поле достаточной мощности возникают вынужденные колебания сердечной мышцы, их амплитуда возрастает и может происходить разрыв сосудов. Это подтверждается в опытах над крысами. После облучения инфразвуком с частотой 7 Гц и мощностью в 170 дБ в течение 20 минут крысы забивались, у них было обнаружено расширение кровеносных сосудов и кровоизлияния в легких.

Если инфразвук находится в противофазе с собственными колебаниями сосудистой системы, то кровообращение тормозится, а при достаточной интенсивности инфразвука сердце может остановиться.

Особенно опасен инфразвук с частотой 7 Гц и около 7 Гц. Эта частота соответствует частоте колебаний альфа-ритмов мозга. Такой инфразвук даже при небольших интенсивностях (120-140 дБ) вызывает расстройство зрения, тошноту, общую слабость. При средних мощностях (140-155 дБ) возникают обмороки, временная потеря зрения, а при больших мощностях (порядка 180 дБ) такой инфразвук вызывает

паралич, разрыв альвеол и приводит к смертельным поражениям.

Поскольку биологическое действие инфразвука оказалось весьма значительным и неблагоприятным, в настоящее время проводятся исследования по выявлению источников инфразвука. Он возникает, например, при поступлении потока воздуха во всасывающее отверстие карбюратора, а также образуется за счет завихрений воздуха при быстром движении автомобиля (Рис.105). Испускание инфразвука увеличивается при движении автобусов и вагонов поездов с открытыми окнами, так как на открытых окнах происходят срывы воздушного потока. Мощными источниками инфразвука являются вертолеты, различные компрессоры, вентиляционные системы. Учитывая вредное действие инфразвука, а также то, что генераторами его являются многие промышленные устройства и транспорт,

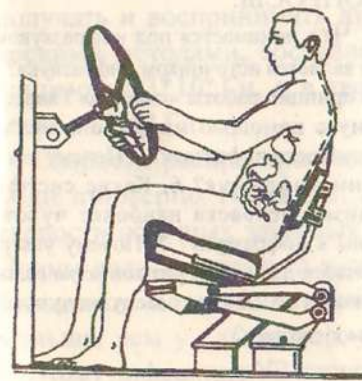


Рис.105

мощность которых с каждым годом возрастает, ряд ученых считает, что некоторые болезни современного человека в определенной степени связаны с увеличением ИЗ-облучения. Поэтому в России и в ряде других стран в последние годы созданы лаборатории по изучению действия инфразвука и по разработке мер по борьбе с ним.

ВОСПРИЯТИЕ ИНФРАЗВУКА ЖИВОТНЫМИ. Воздействие инфразвука на сельскохозяйственных животных исследовано еще недостаточно, но несомненно, что оно аналогично действию на человека. В современном сельском хозяйстве животные подвергаются значительным звуковым и инфразвуковым облучением, которые создают различные двигатели, моторы, компрессоры и электродойки в животноводческих комплексах. Нет



Рис.106

сомнения, что инфразвук оказывает отрицательное влияние на молокоотдачу, на производительность и на многие другие физиологические функции животных. Изучению, а также устранению этого влияния должны быть посвящены усилия многих исследователей.

Некоторые животные способны улавливать инфразвуки. Так, медузы воспринимают колебания с частотой 8-13 Гц, возникающие в районе шторма. Эти инфразвуки доходят до берега за несколько часов до наступления шторма, и медузы заблаговременно уходят в безо-

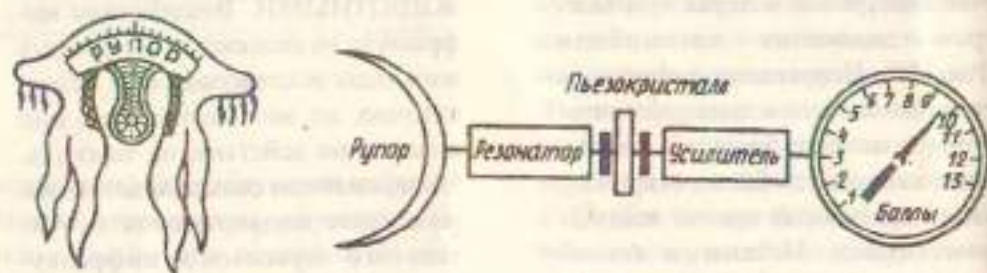


Рис.107

пасную зону.

В теле медузы есть колба, заполненная жидкостью, в которой плавают камешки, соприкасающиеся с нервными окончаниями. ИЗ-волна вызывает резонансные колебания сначала жидкости, а затем камешков, которые возбуждают окончания слухового нерва. По принципу «инфрауха» медузы был создан прибор, состоящий из рупора, резонатора, пьезодатчика, преобразующего механические колебания в электрические импульсы, усилителя и измерительного прибора. Такой прибор позволяет предска-

зывать наступление шторма за 10-15 часов (Рис.107).

Многочисленные наблюдения показывают, что за несколько часов перед началом землетрясения многие животные покидают опасный район, змеи выползают из нор, глубоководные рыбы поднимаются на поверхность. Не исключено, что

это объясняется восприятием животными инфразвуков, которые, как правило, предшествуют землетрясению.

ВОПРОСЫ:

1. Что ловимается под инфразвуком?
2. Что является источником инфразвука?
3. Каков принцип работы «свистка» Гайро.
4. Почему с помощью микрофона нельзя воспроизвести инфразвук?
5. Почему мы не слышим инфразвук?
6. Какие системы организма человека наиболее чувствительны к инфразвуку?
7. Почему ультразвук опасен для альфа-ритмов коры головного мозга?
8. Почему медузы чувствительны к шторму?

§ 20. Биофизика ультразвука.

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКА. Высоко-частотные упругие колебания, не воспринимаемые человеческим ухом, называются ультразвуком (УЗ). Исследования последующих десятилетий показали, что некоторые люди не слышат звуки с частотой более 7 кГц, а у некоторых верхняя граница восприятия звука достигает 25 кГц. Поэтому в настоящее время за нижнюю границу УЗ условно принимается частота 10-15 кГц.

За теоретическую верхнюю границу УЗ принимается 10^{13} Гц, что соответствует длинам волн, сравнимым с расстояниями между атомами и молекулами в твердых телах (10^{-10} м). В газах эта граница определяется длиной свободного пробега молекул, что соответствует частотам порядка 10^7 Гц. Колебания с частотами выше 10^9 Гц называют иногда гиперзвуками. Наиболее высокие частоты, которые удается получить и воспринимать акустическими методами, составляют в жидкостях $3 \cdot 10^9$ Гц, а в твердых телах - $8 \cdot 10^9$ Гц.

Скорости распространения УЗ-волн примерно такие же, как и скорости обычных звуковых волн. Длины волн ультразвука в связи с большими частотами значительно меньше, чем у слышимого звука. Поэтому дифракция УЗ происходит

на объектах меньших размеров, что позволяет изготавливать для этих волн фокусирующие системы (вогнутые и выпуклые зеркала и линзы) и создавать узкие направленные пучки, что практически невозможно для слышимых звуков.

Поглощение УЗ в воздухе весьма значительно, это обусловлено малой длиной волны УЗ.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКА. Для получения УЗ можно использовать механические или электромеханические генераторы.

К механическим генераторам относятся свистки и сирены. Исторически первым источником ультразвука был свисток Гальтона. Это



Рис.108

короткая, закрытая с одного конца труба с острыми краями, на которые направляется воздушная струя, выходящая из кольцеобразного сопла, является основным элементом свистка. Срывы воздушной струи на острых концах трубки вызывают колебания воздуха, частота которых определяется длиной трубки (Рис.108). Свистки Гальтона позволяют получать УЗ-колебания с частотами до 30 кГц, однако мощность таких свистков невелика.

Интересно, что подобными свистками еще в прошлом веке пользовались браконьеры для подзывания охотничьих собак сигналами, неслышимыми для человека.

Мощные ультразвуки создаются сиренами, состоящими из неподвижного диска с отверстиями - статора - и подвижного диска с зубцами - ротора. При вращении ротора отверстия в статоре попеременно то закрываются, то открываются. Если на статор направить сжатый воздух, то возникает пульсирующая воздушная струя.

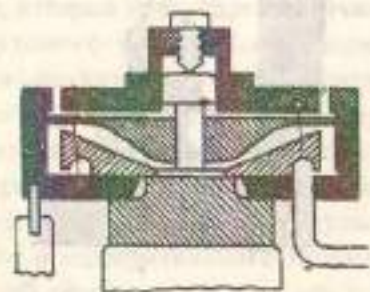


Рис.109

При определенной скорости вращения можно получать ультразвук достаточно большой частоты.

Мощность сирены может быть настолько велика, что если поместить поблизости от нее на пути ультразвука кусочек ваты, то через несколько секунд она вспыхнет, поскольку энергия поглощенного ультразвука переходит в теплоту.

К основным недостаткам механических генераторов относится широкий спектр излучаемых им частот, что не позволяет использовать их для контрольно-измерительных целей как в технике, так и в биологии.

Электромеханические генераторы преобразуют подводимую к ним энергию электрического тока в энергию акустических колебаний. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические и магнитострикционные генераторы.

В основе действия генераторов первого типа лежит пьезоэлектрический эффект, открытый в 1880 г. Пьером Кюри. Если вырезать определенным образом, например, из кристалла кварца пластинку и сжать ее, то на ее гранях, перпендикулярных направлению сжатия, появятся разноименные электрические заряды. При замене сжатия растяжением знаки зарядов меняются. Помимо кварца таким свойством обладают кристаллы титана, бария и некоторые другие.

Пьезоэлектрический эффект



Рис.110

обратим. Это значит, что если к противоположным граням кристалла подвести разноименные электрические заряды, то пластинка деформируется. Таким образом, если кристалл титанита бария поместить между пластинками конденсатора, к которым подведено переменное электрическое напряжение, то кристалл будет деформироваться в такт изменениям напряжения, и на окружающее вещество он будет действовать, как поршень в цилиндре, создавая то сжатия, то разрежения, т.е. продольную волну соответствующей частоты (Рис.110).

Генераторы другого типа основаны на явлении магнитострикции.

Это явление было открыто в 1847 г. Джоулем, который обнаружил, что намагниченный железный стержень немного изменяет свои размеры. Если поместить ферромагнитный стержень в соленоид, подсоединенный к генератору переменного тока, то стержень будет удлиняться и укорачиваться соответственно изменениям электрического тока. Деформации стержня так же, как и деформации пьезокристалла, будут создавать акустическую волну. Магнитострикционные излучатели изготавливают в основном из железа, никеля и некоторых сплавов этих металлов (Рис.111).

Интенсивность УЗ-волн, создаваемых электромеханическими генераторами, может быть весьма значительной. Так, интенсивность ультразвука в воде, создаваемая пьезоэлектрическим генератором, достигает 10^3 Вт/м^2 , что в 10.000 раз больше интенсивности звука от большого духового оркестра.

Регистрацию и измерение ультразвука производят на основе обратимости всех электромеханических явлений. Так, если УЗ-



Рис.111

волна падает на пьезокристалл, помещенный между пластинками конденсатора, то на пластинках возникает переменное электрическое напряжение, которое усиливается электронными усилителями и затем подается на регистрирующие приборы (гальванометры, осциллографы и т.п.).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА С ВЕЩЕСТВОМ. Рассмотрим, с какими параметрами колебательного движения приходится иметь дело при распространении ультразвука в веществе.

Пусть генератор создает УЗ-волну с интенсивностью $J=10^5 \text{ Вт/м}^2$ и частотой 10^3 Гц . Из формулы, определяющей интенсивность волны, выразим значение амплитуды:

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2J}{\rho v}}$$

Так как плотность воды 10^3 кг/м^3 и скорость ультразвука в воде, примерно, 10^3 м/с , то амплитуда смещений частиц воды при данной частоте:

$$A = 0.71 \text{ мкм.}$$

Вычислим амплитудное значение ускорения частиц воды:

$$a = A\omega^2 = 2,8 * 10^5 \text{ м/с}^2.$$

Так как ускорение силы тяжести примерно равно 10 м/с^2 , то ускорение частиц в УЗ-волну превышает ускорение силы тяжести в 28000 раз.

Амплитудное значение акустического давления в УЗ-волне можно

рассчитать:

$$\Delta P = \rho v A \omega = 4,5 \text{ атм.}$$

Большие значения перепадов акустического давления в фазах сжатия и разжатия приводят к весьма своеобразным явлениям. Одно из таких явлений носит название кавитации - образование и захлопывание пузырьков или полостей в жидкости под действием ультразвука. Пузырьки образуются в результате разрыва жидкости в полупериоды растяжения и захлопываются в полупериоды сжатия. Они заполнены насыщенным паром данной жидкости, и иногда на их поверхности образуются электрические заряды. При захлопывании пузырька давление в нем резко возрастает до десятков тысяч атмосфер, и возникающие при этих микровзрывах ударные волны разрушительным образом действуют на встречающиеся на их пути посторонние объекты (частицы твердых тел, микроорганизмы, клеточные мембраны и пр.) Рис. 112.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. Механические явления, возникающие при взаимодействии ультразвука с веществом, сопровождаются тепловыми эффектами, которые обусловлены несколькими причинами. Во-первых, процессы сжатия в УЗ-волне происходят очень быстро, адиабатически, и температура при сжатии повышается. Во-вторых, поглощение ультразвука сопровождается переходом меха-

нической энергии в тепловую.

Образование тепла идет не равномерно, во всей толще жидкости, а, главным образом, в областях, примыкающих к границам раздела сред с различными акустическими сопротивлениями. Если ультразвук переходит в среду с меньшим акустическим сопротивлением, то значительная часть его на границе отражается, и в этом месте интенсивность волны увеличивается, а соответственно возрастает и количество поглощенной энергии. Убедиться в этом можно, прижав к влажной руке излучатель ультразвука. Вскоре после этого на противоположной стороне руки возникает болевое ощущение, похожее на боль от ожога, вызванное ультразвуком, отраженным на границе кожа - воздух.

Помимо механического и теплового действия ультразвук вызывает протекание некоторых химических реакций, что можно заметить на следующем простом опыте. Взяв пробирку, содержащую слегка подкисленный раствор йодистого калия с крахмалом, и поместив в нее излучатель ультразвука, можно заметить, что жидкость окрашивается в результате взаимодействия выделившегося атомарного йода с крахмалом. Количество выделившегося йода зависит от энергии поглощенного ультразвука, и поэтому это явление можно использовать для измерения поглощенной



Рис. 112

дозы ультразвука.

В УЗ-поле могут протекать как окислительные, так и восстановительные реакции, причем даже такие, которые в обычных условиях не осуществимы. Одной из характерных реакций является расщепление молекулы воды на радикалы H^{\bullet} и OH^{\bullet} с последующим образованием перекиси водорода H_2O_2 и некоторых жирных кислот.

Весьма значительное действие оказывает ультразвук на некоторые биохимические соединения: от белковых молекул отрываются молекулы аминокислот, происходит денатурация протеннов и т.п. Все эти химические реакции объясняются, очевидно, колоссальными давлениями, возникающими в ударных кавитационных волнах, однако законченной теории звукохимических реакций в настоящее время еще не существует.

Под действием ультразвука воз-

никает свечение воды и некоторых других жидкостей (УЗ-люминесценция). Это явление, которое в настоящее время подробно исследуется, несет с собой информацию о природе и кинетике процессов, происходящих при облучении жидкости ультразвуком. Так оказалось, что при некоторых заболеваниях УЗ-свечение биологических жидкостей (кровь, моча, лимфа) меняется, что может лечь в основу диагностики этих заболеваний.

ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ. Механизм биологического действия ультразвука до настоящего времени еще недостаточно изучен, и можно лишь утверждать, что он определяется совокупностью механического, термического и физико-химического эффектов.

Механическое действие обусловлено высокочастотными колебаниями, под действием которых происходят пульсации клеток и микромассаж тканей. Микромассажем некоторые ученые объясняют рассасывание в УЗ-поле рубцов, контрактур и других уплотненных тканей. При больших интенсивностях ультразвука в тканях могут возникать кавитационные полости, приводящие к появлению разрушительных ударных волн. В мышечной ткани кавитационные процессы приводят к разрывам отдель-

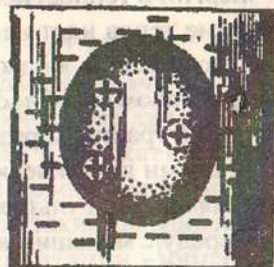


Рис. 113

ных волокон, в клетках - к повреждениям митохондрий, лизосом и других органелл. Возможно также разрушение клеточных мембран. Разрушительное действие кавитации используется в фармацев-

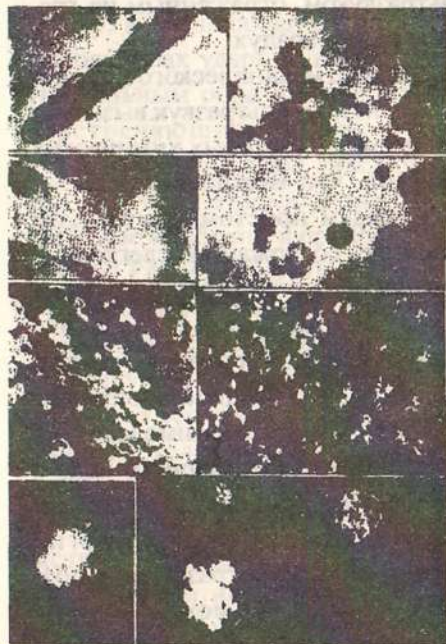


Рис. 114

тической промышленности для уничтожения микроорганизмов и стерилизации препаратов. На рис. 114 показаны фотографии механического действия УЗ на микроорганизмы в биологической структуре.

Нагревание тканей при озвучивании их в терапевтических дозах (т.е. при интенсивностях ультразвука менее $2 \cdot 10^4$ Вт/м²) весьма незначительно. Так, при облучении отдельных органов у коров отмечаются небольшая гиперемия кожи и расширение подкожных сосудов в месте озвучивания. Температура кожи в этой области поднимается всего на 1-1,5 градуса.

Более существенным является физико-химическое действие. Так, озвучивание повышает проницаемость клеточных мембран для ионов калия, кальция, а при значительных интенсивностях мембраны становятся проницаемыми для молекул белка. Подобные эффекты влияют на скорость обмена веществ, а также на величины биопотенциалов клеток и тканей. В результате возникают соответствующие ответные реакции: изменение частоты сердечных сокращений, повышение артериального давления, нарушение координации движений, выпадение волосяного покрова и т.п.

В целом действие ультразвука определяется совокупностью перечисленных явлений и количеством поглощенной энергии. Однако многое в действии УЗ остается еще неясным. Так, отдельно взятые эритроциты вне организма разрушаются при облучении ультразвуком небольшой интенсивности, а эритроциты в живом организме остаются неповрежденными даже при больших интенсивностях. Вообще, изучение биологического действия ультразвука находится еще на уровне эмпирических исследований.

ВОПРОСЫ:

1. Что называется ультразвуком?
2. Какими физическими характеристиками можно описать ультразвуковую волну?
3. Какими способами можно получить ультразвук?
4. В чем суть пьезоэлектрического эффекта? Каким образом эффект можно получить?
5. В чем преимущество электро-механических генераторов ультразвука над механическими?
6. Что такое кавитация? Объясните это явление.
7. Какие действия оказывает ультразвук при взаимодействии его с веществом?
8. Почему биологическая ткань нагревается при ультразвуковом облучении?
9. Каковы последствия при химико-физическом воздействии ультразвука на биологическую ткань?

§ 21. Применение ультразвука.

ЭХОЛОКАЦИЯ. Первые работы по исследованию ультразвука проводились в 1891 г. русским физиком П. Н. Лебедевым. Однако практическое применение ультразвука получил значительно позднее. Поводом к серьезным исследованиям в области ультразвука была настоятельная необходимость создания прибора для обнаружения подводных лодок во время первой мировой войны. Такой прибор был сконструирован французским ученым Полем Ланжевенном в 1918 г.

В основе действия прибора лежит способность ультразвука распространяться узкими направленными пучками. Созданный генератором пучок ультразвука отражается от подводного объекта и улавливается приемником. Изменяя время, прошедшее между испусканием и приемом и зная направление пучка, можно определить координаты объекта под водой. Этот метод, получивший название эхолокации, широко применяется как в военном, так и в гражданском флоте.

Если направить УЗ-пучок вертикально вниз, то можно измерить глубину морского дна, а также исследовать его рельеф, который вычерчивается самописцем, соединенным с эхолокатором. Таким способом, например, ученые обнаружили и исследовали огромный

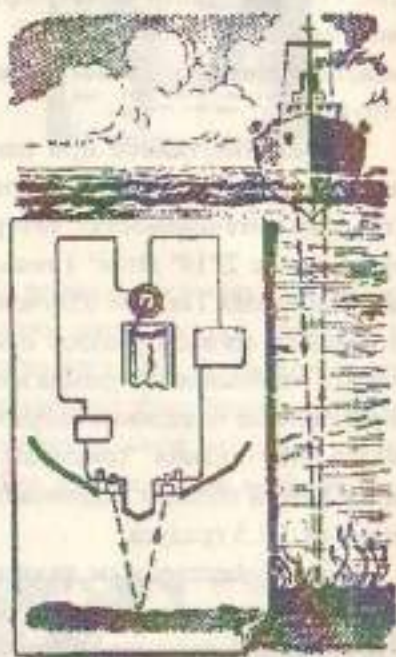


Рис. 115

хребет в Северном Ледовитом океане, названный хребтом Ломоносова. Применяются эхолокаторы и в промышленном рыболовстве: по отражению ультразвука определяется местонахождение и величины косяков рыб.

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ. Как уже говорилось выше, большие давления, возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков, могут разрушать находящиеся в данной жидкости капельки других жидкостей или частички твердых



Рис. 116

тел. Так, если ультразвук распространяется в пробирке, в которой находится вода и ртуть, то ртуть дробится на мельчайшие, не видимые глазом взвешенные в воде капельки (Рис. 116).

Таким образом, получается водно-ртутная эмульсия, т.е. эмульсия из несмешивающихся жидкостей. В настоящее время УЗ-дисперсирование широко применяется в фармакологии при изготовлении коллоидных растворов и лекарственных эмульсий, а также высокодисперсных аэрозолей. Так, камфару при лечении сердечно-сосудистых заболеваний необходимо вводить непосредственно в кровеносные сосуды. Поэтому препараты камфары стало возможно применять только после того, как были разработаны способы УЗ-эмульгирования ее в водных растворах.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ. Это применение ультразвука связано с отражением его на границе раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями. Так, если между генератором и приемником ультразвука поместить металлический стержень, то в однородном стержне

ультразвук поглощается слабо, и в приемник попадает значительный по интенсивности звук. Если же на пути УЗ-пучка в толще металла находится трещина или полость, то пучок отражается от их поверхности и в приемник не попадает. Таким образом, отсутствие отклонения стрелки прибора свидетельствует о наличии неоднородности в образце.

Ультразвуковое резание позволяет обрабатывать хрупкие материалы (керамика, стекло, полупроводники - германий и кремний). Резание производится инструментом (иглой, скальпелем), вибри-



Рис. 117

рующим с УЗ-частотой, который выбирает частицы материала с поверхности обрабатываемой детали.

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В МЕДИЦИНЕ. В медицинской практике обычно используют ультразвук с частотами 0,8-3 МГц и с интенсивностями $(0,05-1,5) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, создаваемый медицинскими и ветеринарными терапевтическими аппаратами, которые комплектуются вибрационными головками различных размеров. Поскольку акустическое сопротивление воздуха значительно меньше, чем у материала головки, то на границе между ними происходит полное отражение ультразвука. Поэтому если между вибратором и поверхностью кожи человека будет слой воздуха толщиной всего в 1 мкм, то в облучаемую ткань попадает не более долей процента излучаемой вибратором энергии. Для обеспечения акустического контакта между телом и вибратором помещается прослойка вещества с большим акустическим сопротивлением (вода, глицерин, вазелиновое масло).

Точное измерение энергии поглощенного ультразвука на современном этапе возможно только в однородном веществе. На пути ультразвука при его терапевтическом применении встречаются ткани с самыми различными формами, размерами, акустическими



Рис. 118

сопротивлениями и коэффициентами поглощения. Поэтому дозу облучения, необходимую для той или иной процедуры, определяют чисто эмпирически.

Ультразвук применяется в терапии для лечения заболеваний суставов, сухожилий, мышечной атрофии. Широко известен метод применяемый на практике фонофореза - метода введения с помощью ультразвука в организм через поры неповрежденной кожи лекарственных веществ (гидрокортизона, тетрациклина и др.). Этот метод аналогичен электрофорезу, однако, если в электрическом поле перемещаются лишь



Рис. 119

заряженные частицы, то в ультразвуковом поле перемещаются частицы независимо от их электрических характеристик. Это позволяет расширить выбор вводимых лекарственных веществ. Кроме того, под действием ультразвука увеличивается проницаемость клеточных мембран, что ведет к проникновению этих веществ в клетку. Методом фонофореза, сопровождаемым ультразвуковым массажем, успешно лечат маститы, фурункулезы и отеки (Рис. 120).

Применение ультразвука в диагностике обусловлено его значительным отражением на границах между тканями с различными акустическими сопротивлениями. Этот метод сходен с рентгенографией, однако изображения двух тканей на рентгеновском снимке отличаются друг от друга только в том случае, если их плотности различаются не

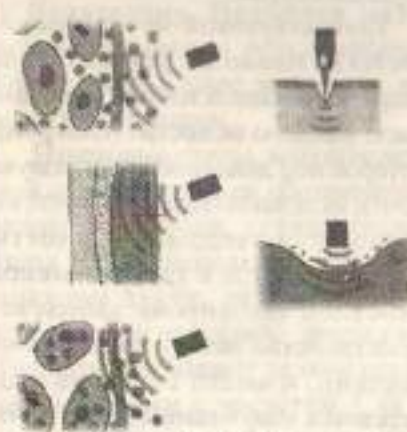


Рис. 120

менее чем на 10%. Поэтому, например, для рентгеноскопии желудка пациенту вводят вещество с большой плотностью и с большой атомной массой (BaSO_4), которые и способствуют получению контрастного изображения желудка на фоне других тканей. Что же касается УЗ-метода, то он позволяет различить мягкие ткани, отличающиеся от плотности всего на 0,1%. Кроме того, ультразвук низких интенсивностей менее вреден для живых существ, чем рентгеновское излучение, а ультразвуковая аппаратура компактная и дешевле рентгеновской.

Генератор (УЗГ) создает импульсы электрических колебаний УЗ-частоты, поступающие на пьезокристалл, от которого в ткани распространяются УЗ-волны. Если волна встречает на своем пути участок, акустическое сопротивление которого отлично от акустического сопротивления окружающей ткани, то волна отражается и попадает обратно на пьезокристалл.

В промежутке времени между посылкой импульсов кристалл колеблется под действием отраженных волн, и в нем создаются электрические колебания, которые поступают в усилитель, а затем на электронно-лучевую трубку, на экране которой возникает изображение участка ткани, отражающего УЗ-волны.

Исследования ультразвуком вну-

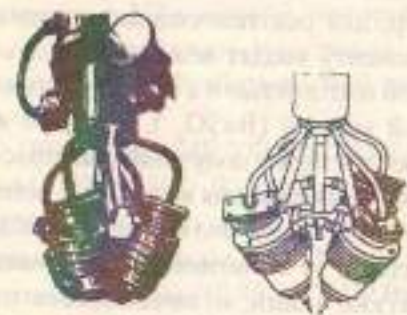


Рис. 121

тренных органов (эхография) применяются в настоящее время в медицине и в ветеринарии. Эхография позволяет получать изображения внутренних стенок сердца (эхокардиография), обнаруживать злокачественные опухоли на ранней стадии их развития, проводить диагностику глазных болезней, беременности, определять прижизненно толщину жирового слоя у свиней и т.п.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ХИРУРГИИ. Еще в 1954 г. проводились операции по удалению опухолей в мозговой ткани без вскрытия черепной коробки. Суть метода в том, что несколько излучателей, укрепленных на голове пациента, испускают УЗ-пучки, фокусирующиеся на опухоли. Интенсивность каждого пучка такова, что он не приводит к повреждению мозговой ткани, но в том месте, где пучки фокусируются, интенсивность ультразвука возрастает и опухоль разрушается.

Учеными был разработан ультразвуковой скальпель, представляющий собой металлический конусообразный вибратор с острым или пилообразным наконечником. Колебания наконечника с частотой 2550 кГц, имеющие амплитуду примерно в 50 мкм, вызывают разрушение ткани, с которой он приходит в соприкосновение. Такой скальпель работает как своеобразная микропила и рассекает как мягкие, так и костные ткани, травмируя их гораздо меньше, чем обычный скальпель. Меньшие деформации, возникающие при действии УЗ-скальпеля, приводят к быстрейшему заживлению оперированной ткани. Поскольку скальпель может быть сделан очень маленьким, им можно пользоваться для операций на таких местах, куда обычный скальпель добраться не может, например, в пищеводе или в дыхательных путях без вскрытия грудной клетки.

Ультразвуковой метод применяется не только для резки, но и для сварки сломанных костей. Учеными было найдено вещество (циакрин), которое под действием ультразвука почти мгновенно полимеризуется и становится твердым, как кость. Циакрин вместе с так называемой «костной щепенкой» заполняет пространство между сломанными костями, и место перелома подвергается озвучиванию. Под влиянием ультразвука циакрин не только

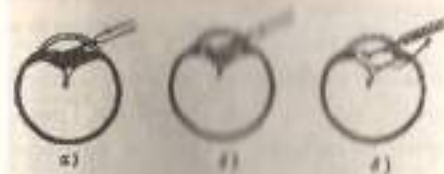


Рис. 122

твердеет, но и проникает в костную ткань, создавая прочный сварной шов, который постепенно рассасывается и заменяется постоянной костной мозолью.

Первые успешные ультразвуковые операции были проведены в 1967 г. В настоящее время отечественной промышленностью выпускается установка, специально предназначенная для целей УЗ-хирургии.

УЛЬТРАЗВУК В МИРЕ ЖИВОТНЫХ. Как указывалось выше, многие животные, птицы и рыбы в состоянии воспринимать акустические колебания, относящиеся к УЗ-диапазону. Наиболее интересным примером использования ультразвука в мире животных является эхолокация.

Некоторые птицы, ведущие ночной образ жизни или обитающие в пещерах (козодои, стрижи-саланганы и др.), используют для эхолокации звуки, относящиеся к слышимому человеком диапазону. Так, козодой издает резкие отрывистые крики с частотой 7 кГц. После каждого крика птица улав-

ливает звук, отраженный от препятствия, и узнает его местоположение по направлению, откуда пришло эхо. Зная скорость распространения звука и время, прошедшее от момента испускания звука до момента восприятия эха, можно вычислить расстояние до препятствия. Таких «вычислений» птица, конечно, не производит, но каким-то образом ее мозг позволяет ей хорошо ориентироваться в пространстве.

Наибольшего совершенства достигли эхолокационные органы у летучих мышей, использующих их не только для ориентировки, но и для поиска пищи. Поскольку пищей для них служат комары, жуки и бабочки, т.е. предметы малых размеров, то для уменьшения дифракции на подобных объектах необходимо использовать колебания с малой длиной волны. В самом деле, если принять размеры насекомого 3 мм, то дифракция на нем будет незначительной при длине волны менее 3 мм, а для этого частота колебаний должна быть, по крайней мере, равной 100 кГц. Отсюда вытекает необходимость использования для эхолокации ультразвука, и, как показывают опыты, летучие мыши испускают сигналы с частотами именно порядка 100 кГц (Рис. 123).

Процесс эхолокации происходит примерно следующим образом. Зверек испускает сигнал длительностью 1-2 мс, причем на это время

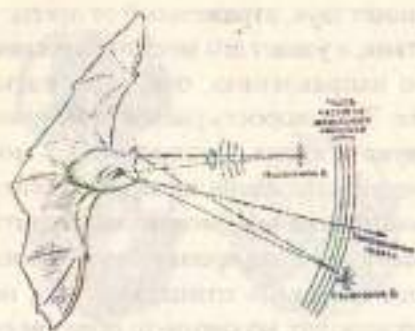


Рис.123

его чувствительные уши закрываются специальными мышцами. Затем сигнал прекращается, уши открываются, и летучая мышь слушает отраженный сигнал. Во время охоты сигналы следуют один за другим до 250 раз в секунду.

Способность летучих мышей летать и охотиться в темноте долгое время считалась загадочной. Еще в 1793 г. итальянский ученый Спалланцани ослепил нетопыря и убедился, что зверек свободно летал в темной комнате, не задевая ни одного из находящихся в ней предметов. Однако, когда ученый заклеивал летучим мышам рот и уши, они полностью теряли способность к ориентации. Опыты Спалланцани не были поняты современниками, и удивительную способность летучих мышей к ориентации в темноте удалось объяснить лишь в 1945 г. после того, как в годы второй мировой войны были созданы радиолокаторы - устройства, определяющие местоположение пред-

метов по отражению от них электромагнитных волн.

Чувствительность эхолокационного устройства летучих мышей очень высока. Так, например, Гриффин натягивал в темной комнате сетку из металлической проволоки диаметром 0,12 мм с расстоянием в 30 см, что лишь немного превышало размах крыльев летучих мышей. Тем не менее, зверьки свободно летали по комнате, не задевая за проволоку. Мощность воспринимаемого сигнала, отраженного от проволоки, в этом случае была менее 10^{-11} Вт. Удивительна также способность летучих мышей выделять из хаоса звуков интересующий их сигнал. Так, в одной из пещер США обитает более 20 миллионов летучих мышей, которые каждую ночь покидают пещеру и возвращаются в нее под утро. Во время охоты каждая из них воспринимает УЗ-сигналы, причем только те, которые испускаются ею самой. Очевидно, испускающие и воспринимающие органы летучей мыши имеют строгую резонансную



Рис.124

настройку на сигналы определенной частоты и они не воспринимают сигналы, отличающиеся от собственных всего лишь на доли герца. Такой чувствительностью и такой избирательностью не обладает пока еще ни одно локаторное устройство, созданное руками человека.

Интересно, что у некоторых насекомых выработались в процессе эволюции чувствительные к ультразвуку органы слуха. Некоторые ночные жуки и бабочки, услышав УЗ-сигнал ныря, складывают крылья, падают и замирают на земле.

Изучение эхолокационного аппарата летучей мыши позволило специалистам-бионикам создать ультразвуковой «фонарь» для слепых. Это небольшого размера прибор, по форме напоминающий обычный карманный фонарь, излучающий УЗ-сигналы. Отраженные от предметов сигналы улавливаются приемником, преобразуются в звуковые сигналы и поступают в наушники. По характеру звуков слепой человек может научиться определять, от каких предметов звук был отражен. Опыты показали, что с помощью такого прибора можно обнаруживать край тротуара, ступеньки лестницы, дверные ручки и т.п.

Используются ультразвуки и обитателями водной среды. Так, некоторые зубатые киты испускают

сигналы с частотой до 150 кГц, что позволяет им охотиться за кальмарами в глубинах океана в полной темноте.

Широко используется УЗ-локация дельфинами. Еще в 1947 г. было замечено, что дельфины в мутной воде и ночью на большой скорости обходят препятствия, специально помещенные в бассейн.

Чувствительность их локатора настолько высока, что они могут обнаруживать на расстоянии 20-30 м осторожно опущенную в воду дробинку. Диапазон частот испускаемых дельфинами сигналов очень широкий, от нескольких десятков герц до 250 кГц, но максимум интенсивности приходится на диапазон 20-60 кГц. Поскольку ультразвук сильно поглощается в воде, то для внутривидового общения



Рис.125

дельфины используют звуки слышимого человеком диапазона, примерно до 400 Гц. В последние годы проводилось много исследований по расшифровке испускаемых дельфинами акустических сигналов с целью обнаружить разум у этих животных. Однако, хотя многие сигналы и обладают вполне определенным смыслом, вряд ли есть основания наделять дельфинов разумом, т.е. свойством, присущим

только человеку и приобретенным им в процессе трудовой деятельности.

ВОПРОСЫ:

1. Что такое ультразвуковая локация?
2. На каких свойствах ультразвука основан метод ультразвуковой диагностики?
3. Что такое фонофорез?
4. Какое воздействие оказывает УЗ на биологические ткани?
5. Приведите примеры использования УЗ волны в хирургии.
6. В чем суть опытов Спалланцани?
7. Какие живые существа могут излучать и воспринимать УЗ волну?

УПРАЖНЕНИЕ 6.

1. Интенсивность звука, создаваемого мычанием быка, равна 10^{-4} Вт/м². Вычислите величину акустического давления, создаваемого этим звуком в воздухе.

2. Для лечения мастита применяется ультразвук с интенсивностью $0,6$ Вт/м². Какая энергия ультразвука пройдет внутрь ткани, если время процедура 10 мин и площадь головки излучателя $4,5$ см²? Коэффициент проникновения ультразвука внутрь ткани $0,9$.

3. Количество энергии, передаваемой ультразвуковой волной телу человека при лечении периаартрита, за один сеанс должно быть 650 Дж при интенсивности ультразвука 8000 Вт/м². Сколько времени должен проводиться сеанс, если площадь вибратора 15 см²?

4. Площадь барабанной перепонки человеческого уха $0,65$ см². Вычислите, какая энергия протекает через перепонку за 1 мин при постоянном шуме в 80 дБ.

5. Кудактанье курицы создает уровень интенсивности шума 90 дБ. Какой уровень интенсивности шума создает одновременное 20 курок в птичнике?

6. Согласно санитарным нормам, нахождение человека в помещении с уровнем интенсивности шума 100 дБ не должно превышать 30 мин. Какая энергия проходит за это время через барабанную перепонку человека, площадь которой 70 мм²?

7. При ультразвуковой терапии сустава ультразвук доходит до костной ткани, проходя через кожу толщиной 1 мм и мышечную ткань толщиной 5 мм. Во сколько раз интенсивность ультразвука, дошедшего до сустава, меньше его интенсивности на поверхности кожи? Показатели поглощения ультразвука с частотой 1 МГц в коже и в мышечной ткани соответственно равны: $0,4$ см⁻¹ и $0,15$ см⁻¹.

САМОЕ ВАЖНОЕ В БИОАКУСТКЕ.

1. Звуковая волна - это физическое явление распространения колебаний в упругой среде. Волна способна переносить энергию, оказывать силовое воздействие на объекты, отгибать и преодолевать препятствия, отражаться и преломляться на границе раздела двух сред, проникать в вещество.

2. Звук вызывает субъективные ощущения у живых организмов. Диапазон восприятия звуковой волны определяется уровнем развития организма, его средой обитания, физиологическими особенностями строения слухового аппарата.

3. Многие живые существа в процессе эволюции приобрели способность излучать звуковую волну, которая в их жизнедеятельности выполняет функцию общения. Человек как венец эволюционной иерархии способен не только испускать звуки, но создавать осмысленную речь.

4. Инфразвуковые колебания не воспринимаются человеческим ухом, однако эти звуки оказывают влияние на организм человека.

5. Ультразвук, как мощное излучение находит широкое применение в диагностике, профилактике и лечении живых организмов. УЗ является средством ориентации некоторых животных.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	3
§1. Предмет биофизики.	3
Что изучает биофизика.	3
Особенности биофизики как науки.	4
Связь биофизики с другими науками.	5
Развитие биофизики.	6
Современная биофизика.	7
БИОМЕХАНИКА.	11
§2. Описание механических движений живых существ.	11
Биомеханические характеристики.	11
Кинематические биомеханические.	12
Динамические биомеханические характеристики.	14
Энергетические биомеханические характеристики.	16
Безразмерные биомеханические характеристики.	17
§3. Двигательный аппарат человека.	19
Структура двигательного аппарата.	19
Биомеханические характеристики опорно-двигательного аппарата.	19
Расчет массы сегмента тела человека.	20
Рычажная система человека.	21
Колебательные движения опорно-двигательного аппарата.	24
Механические свойства кости.	24
§4. Биодинамика мышечного сокращения.	28
Мышечная ткань.	28
Механизм сокращения мышц.	28
Механическая модель мышцы.	29
Свойства мышечной ткани.	30
§5. Биомеханика ходьбы и бега человека.	33
Кинематика ходьбы и бега человека.	33
Динамика ходьбы и бега.	34
Энергетика ходьбы и бега.	36
§6. Биодинамика плавания живых организмов.	38
Общее представление о плавании человека.	38
Динамика плавания.	39
Энергетика плавания.	40
Особенности плавания некоторых живых организмов.	41
§7. Основы полета живых существ.	44
История развития воздухоплавания.	44

История развития воздухоплавания.	44
Теория Н.Е. Жуковского.	44
Причины создания подъемной силы.	45
Факторы обеспечивающие полет птиц.	47
Полет птиц.	49
САМОЕ ВАЖНОЕ В БИОМЕХАНИКЕ.	51
ГЕМОДИНАМИКА.	53
§8. Физические основы гемодинамики.	53
Уравнение непрерывности потока.	53
Уравнение Бернулли.	54
Течение реальной жидкости.	54
§9. Физические свойства крови.	56
Кровь.	56
Скорость оседания эритроцитов.	58
§10. Сердце как механическая система.	60
Сердце.	60
Работа сердца.	61
Расчет работы сердца.	62
§11. Биофизические закономерности движения крови в сердечно-сосудистой системе.	64
Движение крови по сосудам.	64
Закономерности движения крови.	64
Пульсовая волна.	66
§12. Физические основы измерения артериального давления крови.	68
Непосредственное измерение давления крови.	68
Бескровный метод измерения артериального давления крови.	68
Исследование артериального давления крови человека.	69
САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЕМОДИНАМИКЕ.	73
БИОАКУСТИКА	74
§13. Кинематические характеристики звуковой волны.	74
Звуковые волны.	74
Распространение звуковой волны.	76
Уравнение звуковой волны.	77
§14. Звуковые явления.	78
Энергодинамические характеристики акустического поля.	78
Отражение и преломление звуковой волны.	80
Затухание звука.	81

§15. Звук как психофизическое явление.	83
Психофизические характеристики звуковой волны.	83
Закон Вебера-Фехнера.	85
§16. Звукоизлучение в живом мире.	88
Звукоизлучение членистоногих.	88
Звукоизлучение рыб.	89
Звукоизлучение птиц.	90
Звукоизлучение млекопитающих.	92
§17. Восприятие звука живыми существами.	94
Органы слуха простейших.	94
Органы слуха млекопитающих.	95
Особенности слухового восприятия у птиц.	98
Особенности слухового аппарата рыб.	99
§18. Влияние шума на живой организм.	101
Источники шума.	101
Влияние шума на человека и животных.	103
§19. Биофизика инфразвука.	106
Источники инфразвука и его свойства.	106
Распространение инфразвука.	107
Биологическое действие инфразвука.	109
Восприятие инфразвука животными.	111
§20. Биофизика ультразвука.	113
Физические характеристики ультразвука.	113
Методы получения и регистрации ультразвука.	113
Взаимодействие ультразвука с веществом.	116
Ультразвуковые явления.	116
Действие ультразвука на биологические объекты.	118
§21. Применение ультразвука.	120
Эхолокация.	120
Дисперсирование.	120
Ультразвуковая дефектоскопия.	121
Применение ультразвука в медицине.	122
Использование ультразвука в хирургии.	124
Ультразвук в мире животных.	125
САМОЕ ВАЖНОЕ В БИОАКУСТИКЕ.	129
ОГЛАВЛЕНИЕ	130