

**ВВЕДЕНИЕ**  
**В МЕДИЦИНСКУЮ**  
**И БИОЛОГИЧЕСКУЮ ФИЗИКУ**

Минск БГМУ 2022

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

# ВВЕДЕНИЕ В МЕДИЦИНСКУЮ И БИОЛОГИЧЕСКУЮ ФИЗИКУ

Учебно-методическое пособие



Минск БГМУ 2022

УДК 577.3(075.8)

ББК 22.3я73

В24

Рекомендовано Научно-методическим советом университета в качестве учебно-методического пособия 23.06.2021 г., протокол № 6

А в т о р ы: О. Н. Белая, М. В. Гольцева, О. Л. Дорошевич, К. Л. Селицкий

Р е ц е н з е н т ы: д-р физ.-мат. наук, проф. каф. физики твердого тела Белорусского государственного университета В. Г. Шепелевич; каф. общей химии Белорусского государственного медицинского университета

**Введение** в медицинскую и биологическую физику : учебно-методическое пособие / О. Н. Белая [и др.]. – Минск : БГМУ, 2022. – 52 с.

ISBN 978-985-21-1021-1.

Изложены основные физические процессы и явления, сопровождающие и обеспечивающие жизнедеятельность организма, а также физические основы некоторых методов диагностики и лечения. Рассчитано как для аудиторных занятий, так и для самостоятельной работы.

Предназначено для иностранных слушателей факультета профориентации и довузовской подготовки.

УДК 577.3(075.8)

ББК 22.3я73

---

Учебное издание

**Белая** Ольга Николаевна  
**Гольцева** Марина Владимировна  
**Дорошевич** Ольга Леонидовна  
**Селицкий** Кирилл Леонидович

## **ВВЕДЕНИЕ В МЕДИЦИНСКУЮ И БИОЛОГИЧЕСКУЮ ФИЗИКУ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск М. В. Гольцев  
Компьютерная вёрстка Н. М. Федорцовой

Подписано в печать 18.04.22. Формат 60×84/16. Бумага писчая «Снегурочка».

Ризография. Гарнитура «Times».

Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,52. Тираж 120 экз. Заказ 147.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/187 от 18.02.2014.

Ул. Ленинградская, 6, 220006, Минск.

**ISBN 978-985-21-1021-1**

© УО «Белорусский государственный медицинский университет», 2022

## **ВВЕДЕНИЕ**

Данное учебно-методическое пособие способствует приведению в систему знаний, полученных иностранными студентами на родине, восполнению имеющихся пробелов в изучении физики, развитию навыков предметного общения, организации обучения по формированию умений и навыков самостоятельного мышления и принятия решений, критического отношения к получаемой информации, навыков самостоятельного рассмотрения явлений, творческого и комплексного подхода к решению проблем.

Авторы при подготовке к изданию стремились в сжатой и легкой для понимания форме дать необходимый уровень знаний по базовой физике, что в дальнейшем способствует навыкам обучения медицинской и биологической физике.

# ЭЛЕМЕНТЫ БИОМЕХАНИКИ

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Под механическими свойствами биологических тканей рассматривают обычно два их вида. Первый связан с биологической подвижностью (например, ростом клеток, сокращением мышц, движением хромосом в клетках при их делении и т. д.), происходит за счет химических процессов, которые энергетически обеспечиваются АТФ, и этот вид называют активными механическими свойствами биологических систем. Второй вид — это пассивные механические свойства биологических тел.

Большинство биологических тканей анизотропно, их механические свойства неодинаковы в разных направлениях. Это связано с тем, что биологическая ткань образована сочетанием химически различных компонентов, и ее механические свойства отличаются от механических свойств каждого компонента, если взять их в отдельности.

Методы определения механических свойств биологических тканей аналогичны методам определения этих свойств у технических материалов.

Рассмотрим **основные механические свойства:**

1. *Упругость* — способность тел возобновлять размеры (форму или объем) после снятия нагрузок.

2. *Жесткость* — способность материала противодействовать внешней нагрузке.

3. *Прочность* — способность тел противодействовать разрушению под действием внешних сил.

4. *Эластичность* — способность материала изменять размеры под действием внешних нагрузок.

5. *Пластичность* — способность тел сохранять (полностью или частично) изменение размеров после снятия нагрузок.

6. *Хрупкость* — способность материала разрушаться без образования заметных остаточных деформаций.

7. *Вязкость* — динамическое свойство, которое характеризует способность тела противодействовать изменению его формы при действии тангенциальных напряжений.

8. *Текучесть* — динамическое свойство среды, которое характеризует способность отдельных его слоев перемещаться с некоторой скоростью в пространстве относительно других слоев этой среды.

9. *Вязкоупругость* — это свойство материалов быть и вязким, и упругим при деформации. Вязкие материалы при сопротивлении сдвигаются и натягиваются линейно во время напряжения, вязкость является результатом диффузии атомов или молекул в аморфных материалах. Упругие материалы тянутся во время растягивания и быстро возвращаются в обратное состояние, когда уходит напряжение и упругость обычно является результатом растягивания вдоль кристаллографической плоскости в определенном твердом теле. У вязкоупругих материалов указанные выше свойства фактически демонстрируют напряжение в зависимости от времени. Характерным проявлением вязкоупругости материалов будет: рост деформации со временем при поддержании постоянного напряжения (ползучесть), уменьшение напряжения со временем при поддержании постоянной деформации (релаксация), гистерезис (отставание фаз), который приводит к рассеиванию механической энергии при циклической нагрузке.

Вязкоупругость является характерной особенностью механических свойств биологических тканей.

**Костная ткань.** Кость — основной материал опорно-двигательного аппарата, который является разновидностью соединительной ткани.

Плотность костной ткани равна  $2400 \text{ кг/м}^3$ , а ее механические свойства зависят от многих факторов, в том числе от возраста, индивидуальных условий роста организма и, конечно же, от участка организма. Строение кости придает ей нужные механические свойства: твердость, упругость и прочность.

Костная ткань формируется из мезодермы и состоит из клеток, межклеточного неминерализованного органического матрикса, который в свою очередь состоит почти на 90 % из коллагена, и основного минерализованного межклеточного вещества. В первые 20 лет жизни происходит формирование кости и достигается пик костной массы, до 30–35-летнего возраста — период устойчивого состояния, а затем начинается постепенное снижение плотности костной массы. Скорость потери костной массы зависит от возраста, наступления андроменопаузы, сопутствующих заболеваний, приема лекарственных препаратов и влияния негативных факторов (ожирение, хроническое воспаление, злоупотребление алкоголем, малоподвижный образ жизни, курение и многое другое).

**Кожа.** Состоит из волокон коллагена и эластина и основной ткани — матрицы. Коллаген составляет около 75 % сухой массы,

а эластин — около 4 %. Эластин растягивается достаточно сильно (до 200–300 %), примерно как резина. Коллаген может растягиваться до 10 %, что соответствует капроновому волокну.

Таким образом, кожа является вязкоупругим материалом с высокоэластическими свойствами, она хорошо растягивается и удлиняется.

**Мышцы.** В состав мышц входит соединительная ткань, состоящая из волокон коллагена и эластина. Поэтому механические свойства мышц похожи на механические свойства полимеров. Механическое поведение скелетной мышцы следующее: при быстром растяжении мышц на определенную величину напряжение резко возрастает, а затем уменьшается. При большей деформации происходит увеличение межатомных расстояний в молекулах.

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

## ФИЗИКА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

В принятых в общей физике определениях **сила** — это физическая векторная величина, которая определяет меру механического воздействия на материальную точку или тело со стороны других тел или полей, приложение которой обуславливает появление в самом теле деформаций и механических напряжений [1].

В биомеханическом контексте сила рассматривается как способность живых существ напряжением мышц производить физические действия, движения или, другими словами, напряжением мышц преодолевать механические и биомеханические силы, препятствующие действию [2].

Мышцы могут проявлять силу без изменения своей длины (изометрический режим), при уменьшении длины (изотонический режим), при удлинении (эксцентрический режим), а также в ходе сокращения мышц возможно соблюдение либо постоянной скорости, либо силы (изокинетический режим).

Силовое проявление мышцы зависит от ряда факторов: количества активированных двигательных единиц и мышечных волокон; ко-

личества миофибрилл в каждом мышечном волокне; скорости сокращения миофибрилл, которая, в свою очередь, зависит от активности миозиновой АТФ-азы и величины внешнего сопротивления; ряда законов механики мышечного сокращения (сила – длина мышцы, сила – скорость сокращения); интенсивности активации мотонейронного пула спинного мозга данной мышцы и т. д. [3]

Человек для сокращения любой мышцы активизирует соответствующий двигательный нейрон в коре головного мозга, который посылает импульсы в спинной мозг к мотонейронному пулу, обслуживающему данную мышцу. Далее активация мотонейрона приводит к рекрутированию или возбуждению соответствующих мышечных волокон. Активное мышечное волокно стимулирует образование актин-миозиновых мостиков, продолжительность работы которых составляет 1 мс и начало их поворота и мышечного сокращения. На процесс поворота мостиков и отсоединение актина от миозина тратится энергия одной молекулы АТФ. Вероятность образования мостиков зависит от взаимного расположения между собой нитей актина и миозина, отсюда возникает зависимость «сила – длина активной мышца», определяемая относительным расположением между собой головок миозина и активных центров актина. Максимальное количество мостиков возникает при некоторой усредненной длине мышцы, а отклонение от этой длины в любую сторону ведет к снижению силовых проявлений мышечного волокна. Однако, например, в случае растяжения некоторых мышц, в частности, в мышцах-сгибателях голеностопного или лучезапястного сустава еще не в активном состоянии могут возникать значительные силы сопротивления растяжению. Эти силы связаны с растяжением соединительных тканей. В биомеханике в таком случае говорят о параллельном упругом компоненте мышцы, и такой упругостью, которую называют последовательной упругой компонентой, обладают сухожилия, зет-пластинки саркомеров и нити миозина, к которым прикреплены головки.

Вероятность образования мостиков зависит также от скорости взаимного перемещения (скольжения) одной из нитей актина и миозина по отношению к другой, соответственно, имеется еще зависимость «сила – скорость».

Растягивание активированной мышцы приводит к накоплению энергии упругой деформации в последовательной упругой компоненте и одновременно к прекращению работы актин-миозиновых мостиков и далее их разрыву благодаря действию внешней механической

силы. Установлено, что работа мышц выполняется с очень высоких коэффициентов полезного действия и с минимальными затратами АТФ.

Мышечные усилия при воздействии на ткани человека вызывают деформацию этих тканей и создают в них механические напряжения, которые безопасны для организма до определенных значений, но их превышение может приводить к разнообразным травмам, к растяжению мышц, связок, вывихам, переломам.

## **ВЕС, ПЕРЕГРУЗКИ, НЕВЕСОМОСТЬ**

### **Действие перегрузок и невесомости на организм человека.**

Вес тела — это сила, с которой тело вследствие его притяжения к Земле действует на опору или подвес.

1. Если тело и опора (подвес) находятся в покое или движутся равномерно и прямолинейно, то вес тела равен силе тяжести:

$$P = mg$$

Если тело и опора (подвес) движутся с ускорением, то возникают перегрузки или происходит уменьшение веса.

2. Перегрузки возникают во время разгона или торможения скоростного транспорта, при старте космических ракет. Вес тел при ускоренном вертикальном подъеме:

$$P = m(g + a)$$

Ускорение при взлете ракеты может в несколько раз быть больше ускорения силы тяжести  $g$  ( $a = ng$ , где  $n > 1$ ). В этом случае говорят о перегрузке (перегрузка показывает во сколько раз вес тела движущегося с ускорением больше веса тела в покое).

Каковы воздействия перегрузок на человека? Они зависят от продолжительности перегрузки, состояния организма, направления возникающей силы тяжести относительно осей тела человека и других факторов. В табл. 1 приведены эффекты, сопровождающие различные перегрузки, когда сила тяжести при ускоренном движении человека действует в направлении от головы к ногам.

3. При движении тела с ускорением, направленным вертикально вниз (условия движения и перегрузки приведены в табл. 2), вес тела уменьшается:

$$P = m(g - a)$$

Невесомость наступает при движении по орбите искусственных спутников Земли, космических станций, т. к. их движение является «падением» с ускорением  $a = g$ . Вес тел в этом случае

$$P = m(g - a) = 0$$

Таблица 1

**Воздействие перегрузок на человека при направлении силы тяжести от головы к ногам**

Величина перегрузки	Воздействие на человека
До 3	Ощущается давление всего тела на сиденье, напряжение мышц, но нарушения самочувствия не наблюдается
3–5	Требуются значительные усилия для удержания головы в вертикальном положении; ощущаются затруднительность дыхания, неприятные, а подчас болезненные ощущения от смещения внутренних органов; уменьшается точность движений, увеличивается число ошибок при оценке показаний приборов; меняется внешний облик человека из-за смещения подвижных участков кожи на лице
6–7	При воздействии свыше 5 с могут возникнуть нарушения сознания

Таблица 2

**Значения перегрузок, возникающих в некоторых условиях**

Условия	Перегрузка
Лифт, начинающий движение вверх или тормозящий при движении вниз	1,2–1,3
Катание на карусели	1,1
Старт спринтера	1,8–2,0
Раскрытие парашюта через 15 с после начала падения	6–12
Перегрузка при приземлении парашютиста со скоростью 5 м/с	3,5–4,0
Самолет при выполнении фигур высшего пилотажа	3–9
Катапультирование из самолета	До 20

У человека в состоянии невесомости исчезают нагрузки на все суставы и натяжения всех связок и сухожилий, которые были на Земле в обычных условиях. Условия жизни в состоянии невесомости резко отличаются от привычных земных, что вызывает изменение ряда жизненных функций человека. Так, невесомость ставит центральную нервную систему и рецепторы многих анализаторных систем (вестибулярного аппарата, мышечно-суставного аппарата, кровеносных сосудов) в необычные условия функционирования. Ввиду этого невесомость рассматривают как специфический интегральный раздражитель, действующий на организм человека и животного в течение всего

орбитального полета. Ответом на этот раздражитель являются приспособительные процессы в физиологических системах; степень их проявления зависит от продолжительности и в значительно меньшей степени от индивидуальных особенностей организма.

С наступлением состояния невесомости у некоторых космонавтов возникают вестибулярные расстройства. Длительное время сохраняется чувство тяжести в области головы (за счет усиленного притока крови к ней). Вместе с тем адаптация к невесомости происходит, как правило, без серьезных осложнений: человек сохраняет работоспособность и успешно выполняет рабочие операции.

Если в полете не применялись средства профилактики, то в первые часы и сутки после приземления у человека, совершившего длительный космический полет, наблюдается следующий комплекс изменений.

- нарушение способности поддерживать вертикальную позу в статике и динамике; ощущение тяжести частей тела (окружающие предметы воспринимаются как необычно тяжелые);

- нарушение гемодинамики при работе средней и высокой интенсивности; возможны предобморочные и обморочные состояния после перехода из горизонтального положения в вертикальное;

- нарушение процессов обмена веществ, особенно водно-солевого обмена, что сопровождается относительным обезвоживанием тканей, снижением объема циркулирующей крови, уменьшением содержания в тканях ряда элементов, в частности калия и кальция;

- нарушение кислородного режима организма при физических нагрузках;

- снижение иммунобиологической резистентности;

- вестибуловегетативные расстройства.

### **Задачи**

1. Космонавт массой 100 кг стартует в ракете с ускорением  $2g$ . Во сколько раз его вес больше его силы тяжести?

2. Каков вес человека, опускающегося в скоростном лифте с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Масса человека 70 кг.

3. Центрифуга, используемая для изучения влияния ускорения на организм человека, совершала 12 об/мин. Затем в течение 5 с число оборотов центрифуги изменилось так, что летчик стал испытывать ускорение  $10g$ . Определите угловое ускорение движения летчика, если он находился на расстоянии 7 м от оси вращения центрифуги.

4. При катапультировании скорость вылета сиденья из кабины равна примерно 20 м/с, путь разгона — 1,2 м. Определите величину ускорения и время его действия на летчика.

5. Парашютист массой 70 кг после отделения от самолета пролетел 320 м, не раскрывая парашюта, и приобрел скорость 50 м/с. Определите среднюю силу сопротивления воздуха при свободном падении парашютиста.

### РЫЧАГИ В ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ЧЕЛОВЕКА

Движущиеся части механизмов обычно бывают соединены частями. Подвижное соединение нескольких звеньев образует кинематическую связь. Тело человека — пример кинематической связи. Опорно-двигательная система человека, состоящая из сочлененных между собой костей скелета и мышц, представляет с точки зрения физики совокупность рычагов, удерживаемых человеком в равновесии.

**Рычаг I рода.** В биомеханике он называется «рычагом равновесия». Поскольку точка опоры А расположена между двумя точками приложения силы Б и В, рычаг еще называют «двуплечим». Такой рычаг нам демонстрирует соединения позвоночника и черепной коробки (рис. 1).

Если вращающий момент силы, действующей на затылочную часть черепа, равен вращающему моменту силы тяжести, действующему на переднюю часть черепа, и они имеют одинаковое плечо рычага, достигается равновесие. Нам удобно, мы не замечаем разнонаправленного действия, и мышцы не напряжены.

**Рычаг II рода.** В биомеханике он подразделяется на два вида. Название и действие этого рычага зависят от места расположения приложения нагрузки, но у рычагов обоих видов точка приложения силы точка приложения сопротивления находятся по одну сторону от точки опоры, поэтому оба рычага являются «одноплечими». Рычаг силы образуется при условии, что длина плеча приложения силы мышц длиннее плеча приложения силы тяжести (сопротивления). В качестве наглядного примера можно продемонстрировать человеческую стопу (рис. 2).

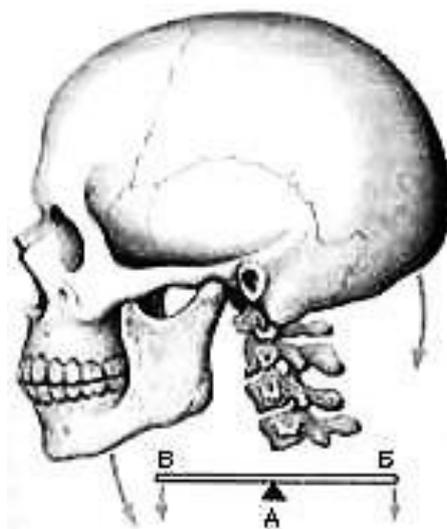


Рис. 1. Рычаг равновесия

Осью вращения здесь являются головки плюсневых костей, пяточная кость служит точкой приложения силы, а тяжесть тела образует сопротивление в голеностопном суставе. Здесь имеет место выигрыш в силе за счет более длинного плеча приложения силы и проигрыш в скорости. Рычаг скорости имеет более короткое плечо приложения мышечной силы, чем плечо силы противодействия (силы тяжести). Примером может служить работа мышц-сгибателей в локтевом суставе (рис. 3). Бицепс крепится вблизи точки вращения (локтевой сустав), и с таким коротким плечом необходима дополнительная сила мышце-сгибателю. Здесь имеет место выигрыш в скорости и ходе движения, но проигрыш в силе (примерно в 8 раз). То есть кисть движется в 8 раз быстрее, чем сокращается мышца, а перемещение кисти в 8 раз больше величины сокращения мышцы.

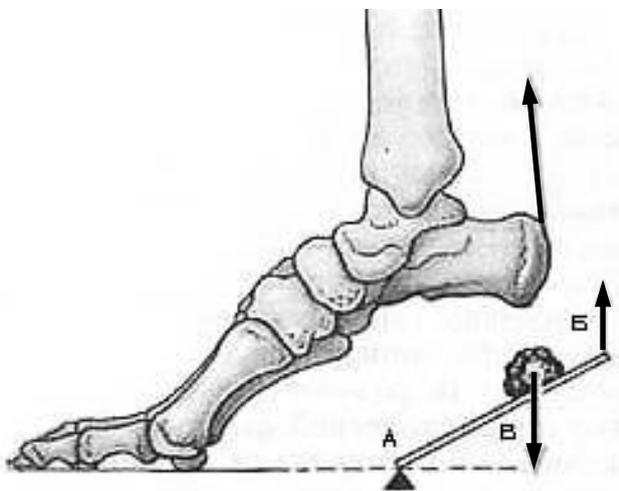


Рис. 2. Рычаг силы

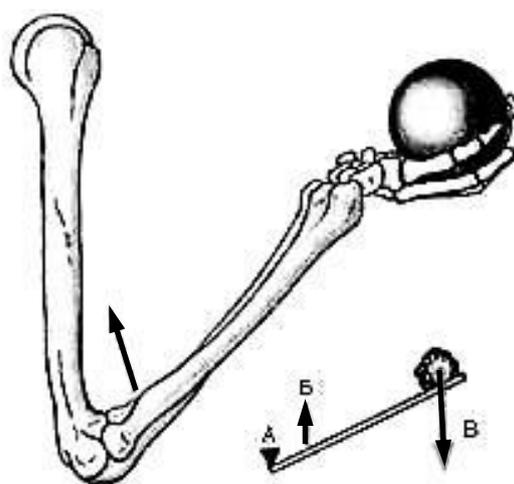


Рис. 3. Рычаг скорости

В теле человека встречаются рычаги I и II рода. Для разных мышц, прикрепленных в разных местах костного звена, рычаг может быть разного рода. Например, относительно своих сгибателей предплечье представляет рычаг II рода, относительно же мышц разгибателей (при удержании груза над головой) — рычаг I рода.

### Вопросы

1. Какие рычаги встречаются в опорно-двигательном аппарате человека?
2. Чем отличаются рычаги скорости и силы? Приведите примеры этих рычагов.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ, ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНИЗМ

## ВИБРАЦИИ И РЕЗОНАНСЫ ЧЕЛОВЕКА

Повсеместное внедрение в жизнь человека различных машин и механизмов повышает производительность труда. Однако работа многих механизмов связана с возникновением вибраций, которые передаются человеку и оказывают на него вредное воздействие.

Вибрация — вынужденные колебания тела, при которых колеблется все тело как одно целое или отдельные его части колеблются с разными амплитудами и частотами.

Колебания тела называются вынужденными, если они вызваны периодическим воздействием на него другого тела. Амплитуда колебаний зависит от соотношения интервалов времени, в течение которых на тело действует посторонняя сила, и периодов собственных колебаний тела. Это можно наблюдать при раскачивании качелей. Качели, являясь своего рода маятником, имеют свой период колебаний (частоту колебаний); если качели толкать с интервалами, равными периоду собственных колебаний, то амплитуда качелей резко возрастет. Это явление называется резонансом.

В повседневной жизни люди постоянно испытывают различные виды вибрационных воздействий. Вибрации, возникшие в любой части тела (например, в руке рабочего, держащего отбойный молоток), распространяются по всему телу в виде упругих волн. Эти волны вызывают переменные деформации различного типа (сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб) в тканях тела. В основе воздействия вибраций на человека лежит множество факторов, характеризующих вибрации: частота, амплитуда, скорость и ускорение колеблющейся точки, энергия колебательных процессов.

Продолжительное воздействие вибрации вызывает нарушения нормальных физиологических функций организма. Возможно возникновение «вибрационной болезни». Это заболевание вызывает ряд серьезных функциональных нарушений.

Влияние вибраций зависит от интенсивности, частоты, продолжительности вибраций, места их расположения и направления по отношению к телу, позы, а также от состояния и индивидуальных особенностей человека.

Колебания с частотой 3–5 Гц вызывают реакции вестибулярного аппарата, сосудистые нарушения. На частотах 3–15 Гц наблюдаются

нарушения, связанные с резонансными колебаниями отдельных органов (печени, желудка, головы) и тела в целом. Колебания с частотой 11–45 Гц вызывают ухудшение зрения, тошноту и рвоту. На частотах выше 45 Гц возможно повреждение сосудов головного мозга, нарушение кровообращения.

В то же время в ряде случаев вибрации применяются в медицине. Например, с помощью специального вибратора стоматолог готовит амальгаму. Использование высокочастотных вибрационных устройств позволяет просверлить в зубе отверстие сложной формы. Кроме того, вибрация используется при массаже.

### ЗВУК И УЛЬТРАЗВУК В МЕДИЦИНЕ



Рис. 4. Аппарат ультразвуковой диагностический GE Vivid S60

Механические волны с частотой от 20 кГц до 109–1010 Гц называются ультразвуком. Ультразвуковая диагностика — это метод лучевой диагностики, который использует ультразвуковые волны для получения изображения внутренних органов человеческого тела. Метод основан на регистрации ультразвуковых волн, отраженных внутренними структурами. Для диагностики используются различные ультразвуковые аппараты, пример одного из них приведен на рис. 4.

Скорость распространения ультразвука определяется только свойствами среды (ткани), в основном плотностью. Для некоторых тканей скорость ультразвука приведена в табл. 3.

Таблица 3

#### Скорость ультразвука в различных тканях

Ткань	Скорость, м/с
Жировая ткань	1350–1470
Мышечная ткань	1560–1620
Кровь	1540–1600
Печень	1550–1610
Головной мозг	1520–1570
Костная ткань	2500–4300

С помощью ультразвука можно обследовать или вылечить пациента — все зависит от частоты, на которой работает прибор. В этом случае, чем выше частота (или короче длина волны), тем выше разрешение ультразвукового устройства, способность видеть более мелкие детали изображения. С другой стороны, чем выше частота, тем меньше глубина сканирования. В ультразвуковой диагностике используется диапазон 2–15 МГц. Соотношения частоты и глубины проникновения ультразвука в мягкие ткани тела приведены в табл. 4.

*Таблица 4*

**Соотношения частоты и глубины проникновения ультразвука  
в мягкие ткани тела**

<b>Частота, МГц</b>	<b>Глубина проникновения, см</b>
1	До 50
3,5	30
5	15
7,5	7
10	5

Диагностические ультразвуковые сканеры — это наиболее распространенное применение ультразвуковой волновой технологии, которое используется в большинстве областей медицины для визуализации внутренних структур и органов, получения данных об их линейном положении, форме и размере.

На сегодняшний день это наиболее безопасный метод, обладающий в то же время достаточной чувствительностью и точностью при исследовании насыщенных жидкостью мягких тканей и органов. На ультразвуковом изображении четко видны опухоли (и их можно дифференцировать); диффузные изменения тканей поджелудочной железы, печени, почек; камни в почках и желчном пузыре; структурные аномалии внутренних органов.

УЗ метод полезен в кардиологии — эхография сердца делает видимыми его структуры, позволяет оценить размеры желудочков, предсердий, межжелудочковой перегородки, определить состояние клапанов и толщину миокарда желудочков, обнаружить жидкость в перикарде.

В хирургии ультразвуковая визуализация используется для визуального контроля выполняемых манипуляций, точного определения траектории движения микрохирургических инструментов, локализации патологических участков и установки имплантатов.

Безопасность и отсутствие радиационного облучения позволяет использовать ультразвуковые аппараты в гинекологии, акушерстве и перинатальной диагностике для исследования внутренних репродуктивных органов, состояния матки и наблюдения за развитием плода. Ультразвуковая маммография — безопасная альтернатива рентгенологическому методу для оценки состояния молочных желез.

Не менее разнообразны возможности использования ультразвука в терапевтических целях — в стоматологии, физиотерапии, травматологии, спортивной медицине используются противовоспалительные свойства ультразвуковых волн, их способность улучшать микроциркуляцию, снимать боль и отек, стимулировать регенерацию хрящевой и костной ткани.

### **Задачи и вопросы**

1. Рука человека при ходьбе совершает гармонические колебания по уравнению  $x = 17\sin 1,6\pi t$  (см). Определите время прохождения руки от положения равновесия до максимального отклонения.

2. Определите резонансную частоту ноги человека, рассматривая ее как физический маятник с приведенной длиной 38,8 см (центр тяжести ноги расположен на высоте 38,8 см).

3. При действии вибрации (колебаний) с постоянной амплитудой по телу человека при частотах от 10 до 30 Гц ощущается сотрясение всего тела; с повышением частоты до 40 Гц — сильная вибрация головы и челюстей. С дальнейшим повышением частоты ощущение вибраций отмечается в области туловища, а при действии частот выше 50 Гц — в области голени. Чем объяснить это явление?

4. Одинакова ли скорость распространения звуков разной частоты в воздухе?

5. Голос человека можно слышать на большом расстоянии, но слова разобрать трудно. Чем это объяснить, если учесть, что скорость распространения звуков разной частоты одинакова?

6. При диагностировании патологического изменения в тканях организма ультразвуковым методом, отраженный сигнал был принят через  $5 \cdot 10^{-5}$  с после излучения. На какой глубине в тканях была обнаружена неоднородность? Скорость ультразвука принять равной 1540 м/с.

# ГИДРОСТАТИКА И ГИДРОДИНАМИКА В МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГИДРОСТАТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕШЕНИЮ МЕДИЦИНСКИХ ЗАДАЧ

Гидростатика — это теория поведения неподвижных жидкостей. Можно сравнить гидростатику с теорией упругости твёрдых тел, но в отличие от твёрдого тела жидкость не «держит» напряжения сдвига, поэтому в жидкости не может существовать анизотропии напряжений, а значит напряжения в жидкости описываются единственной величиной — давлением  $P$ . Отсюда вытекает закон Паскаля: давление, оказываемое на жидкость, передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях. Паскаль, используя открытый им закон, изобрел медицинский шприц и гидравлический пресс.

Основной закон гидростатики для слоя жидкости — зависимость давления  $P$  от глубины  $h$ , который для несжимаемой жидкости в однородном поле тяжести имеет вид  $P = \rho gh$ , где  $\rho$  — плотность жидкости. В медицине гидростатическое давление в кровеносных сосудах — это давление крови на стенку сосуда.

Из закона Паскаля следует равенство уровней в сообщающихся сосудах, с ним же коррелирует закон Архимеда: на тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила  $F = \rho gV$ , где  $\rho$  — плотность жидкости, а  $V$  — объём тела, погруженного в жидкость. Формально закон Архимеда — это всего лишь частный случай закона Паскаля. Наглядно представить себе закон Архимеда можно следующим образом. Замена тела, помещенного в жидкость, на саму эту жидкость ничего не изменит для окружающей тело жидкости. При этом жидкость-заменитель будет невесомой, поскольку она идентична остальной жидкости и иной вес означал бы движение вверх или вниз и возможность получения энергии из ничего. А поскольку жидкость-заменитель «на воздухе» весила бы как раз столько, сколько положено по закону Архимеда,  $\rho gV$ , то именно этот вес тело, погружённое в жидкость, теряет.

Форма свободной поверхности жидкости определяется комбинацией внешних сил (прежде всего, сил тяготения) и сил поверхностного натяжения. Для больших масс жидкости преобладают силы тяготения, и свободная поверхность принимает форму эквипотенциальной поверхности, а при размерах порядка или меньше сантиметра (для пресной воды) определяющими являются капиллярные силы.

## ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПО ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ТРУБАМ

В гидростатике мы рассматривали покоящиеся жидкости. Гидродинамика изучает течение различных жидкостей. Основная задача гидродинамики — установить законы, которые определяют течения жидкостей. Если течение плавное и смежные слои жидкости как бы скользят друг относительно друга, то его называют ламинарным. Другой тип течения характеризуется наличием завихрений и называется турбулентным.

Траектория, по которой движется данная частица в установившемся ламинарном потоке, называется линией тока. Скорость жидкости в любой точке потока направлена по касательной к линии тока. Часть потока жидкости, ограниченная со всех сторон линиями тока, называется трубкой тока.

Для установления связи между скоростью ламинарного течения жидкости и площадью поперечного сечения участка, через который она протекает, выделим в трубке тока участки с площадью течения  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 5). В пределах этих сечений скорости частиц жидкости направлены перпендикулярно выделенным площадкам и равны по величине  $v_1$  и  $v_2$ . С учетом того, что жидкость практически несжимаема, объем жидкости, протекающей через выделенные сечения за один и тот же промежуток времени  $t$ , будет одинаковым:  $V_1 = V_2$ . Условно считая отрезок трубы цилиндром с основанием, равным площади сечения  $S$ , и высотой, равной длине участка трубы  $l$ , получаем:  $V_1 = S_1 l_1 = S_1 v_1 t$ , а  $V_2 = S_2 l_2 = S_2 v_2 t$ , тогда с учетом, что  $V_1 = V_2$ , можно записать равенство  $S_1 v_1 t = S_2 v_2 t$  или, сокращая в равенствах параметр  $t$ , окончательно получаем  $S_1 v_1 = S_2 v_2$  или  $Sv = \text{const}$ . Данное выражение получило название «**условие неразрывности струи**»: при ламинарном течении несжимаемой жидкости через любые сечения трубки тока в каждый момент времени протекают одинаковые объемы жидкости, равные произведению площади сечения на среднюю скорость движения ее частиц.

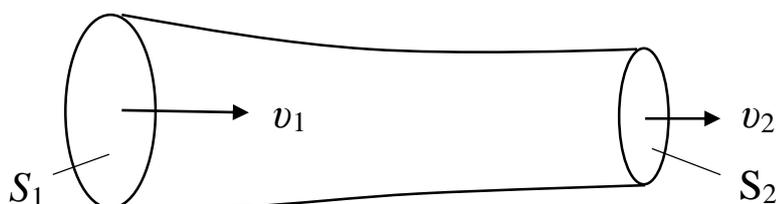


Рис. 5. Течение жидкости по трубке тока с переменным сечением  $S$

Для двух разных сечений можно записать так:  $\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}$ . Таким

образом, линейные скорости в различных сечениях трубки тока обратно пропорциональны площадям соответствующих сечений.

При течении жидкости различают линейную  $v$  и объемную  $Q$  скорости течения жидкости. Считая, что линейная скорость  $v$  — это путь  $l$ , проходимый частицами жидкости в единицу времени  $t$ , для равномерного течения  $v = \frac{l}{t}$ , Если  $V$  — это объем жидкости, протекающий

через некоторое поперечное сечение  $S$  за время  $t$ , то объемная скорость течения  $Q$ , называемая также «расход жидкости», определяется выражением  $Q = \frac{V}{t}$ .

Так как  $Q = \frac{V}{t}$ , а  $V = S \cdot l$ , то получим:  $Q = \frac{Sl}{t} = S \cdot v$ .

В СИ  $[v] = \text{м/с}$ ,  $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$ .

Таким образом, учитывая связь между линейной и объемной скоростью течения жидкости, условие неразрывности струи можно записать как  $Q = S \cdot v = \text{const}$ .

Важно, что условие неразрывности струи верно не только для реальной жидкости в технической гидросистеме, но действует и в реальной гемодинамике, где звучит следующим образом: в любом сечении сердечно-сосудистой системы объемная скорость кровотока  $Q$  есть величина постоянная.

Очевидно, что при постоянной объемной скорости кровотока  $Q$  средняя линейная скорость кровотока  $v_{\text{ср}}$  не может быть постоянной. Согласно условию ламинарного течения, она зависит от поперечного сечения  $S$ : чем больше  $S$ , тем меньше  $v_{\text{ср}}$ . Учитывая суммарное поперечное сечение, самым широким местом в сосудистой системе является отдел капилляров: суммарное поперечное сечение капилляров в 500–600 раз больше поперечного сечения аорты. Поэтому кровь в капиллярах движется в 500–600 раз медленнее, чем в аорте. С этой точки зрения аорта является самым узким местом в сосудистой системе и, соответственно, средняя линейная скорость кровотока в аорте  $v$  максимальная и составляет  $\sim 0,5$  м/с (рис. 6).

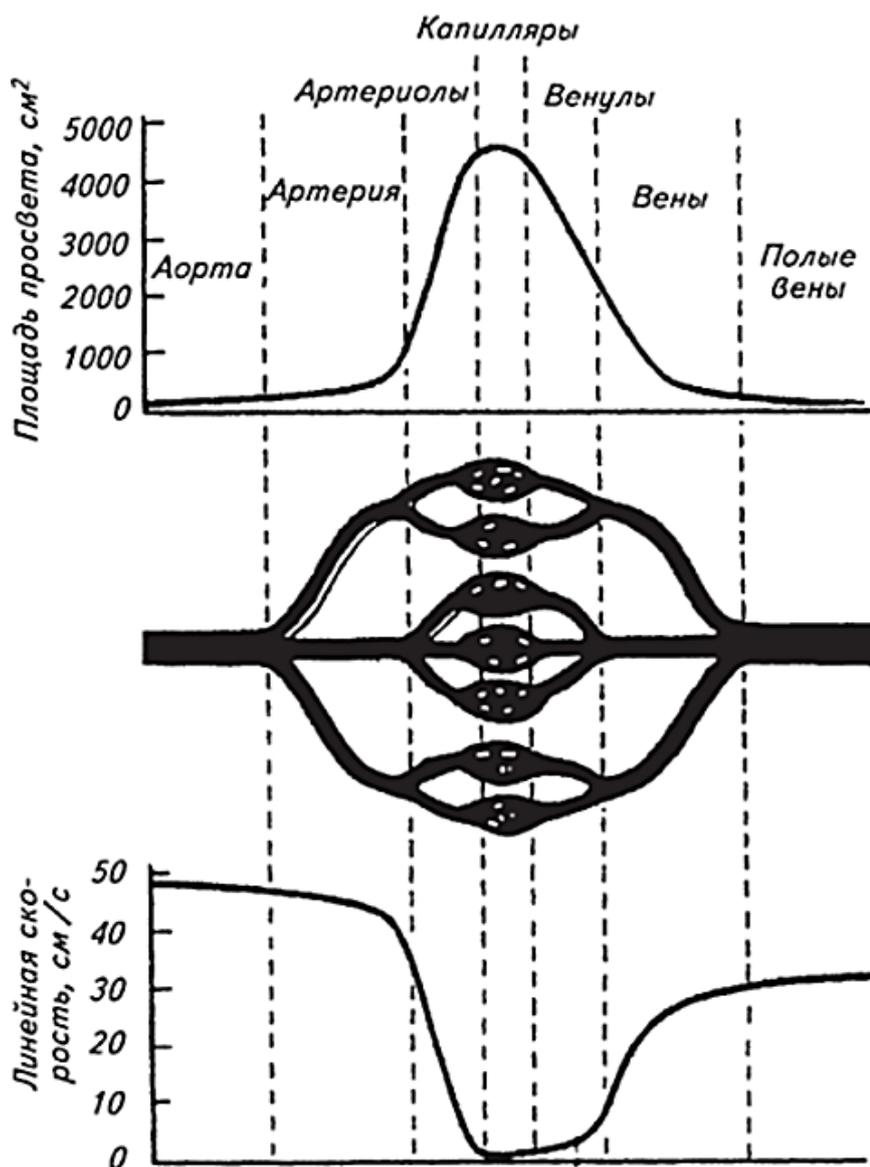


Рис. 6. Распределение линейной скорости течения крови по сосудистой системе

В полых венах средняя линейная скорость кровотока  $v$  составляет 0,25–0,3 м/с, т. к. суммарное поперечное сечение вен по отношению к поперечному сечению аорты увеличивается в 2 раза, а по отношению к капиллярам — уменьшается.

Основным соотношением, описывающим течение идеальной жидкости в трубке тока с переменными сечениями  $S$ , расположенными на разных высотах  $h$  от уровня поверхности, с линейной скоростью частиц жидкости в этих сечениях  $v$ , является уравнение Бернулли, которое следует из закона сохранения энергии для движущейся

жидкости и имеет вид:  $P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const.}$

Согласно уравнению Бернулли, сумма разнопричинных давлений в любом сечении трубки тока является постоянной величиной. Все члены этого уравнения имеют размерность давления:  $P$  — статическое давление,  $\frac{\rho v^2}{2}$  — динамическое давление,  $\rho gh$  — весовое или гидростатическое давление. Уравнение Бернулли применимо не только к идеальной, но с определенными допущениями и к реальной жидкости, в первую очередь для жидкости с невысокой вязкостью. Это связано с тем, что при его выводе не учитываются действия сил трения, в том числе внутреннего трения (вязкости) жидкости. В медицинской практике успешно применяются методики, основанные и рассчитываемые на основе уравнения Бернулли: способы измерения скорости движения жидкости и прямой метод измерения скорости кровотока с использованием капиллярных трубок и трубок Пито, использование всасывающего действия струи при течении жидкости по горизонтальной трубе переменного сечения для создания водоструйных насосов и ингаляторов, прогноз расчетным методом с использованием гемодинамических параметров ряда кардиоваскулярных патологий, таких, как процесса закупорки артерии, появления артериальных шумов, возникновения и развития аневризмы в различных участках сосудистой системы.

### Задачи

1. Скорость течения воды в некотором сечении горизонтальной трубы  $v = 5$  см/с. Какова скорость течения в той части трубы, которая имеет вдвое меньший диаметр? Вдвое меньшую площадь поперечного сечения?

2. В широкой части горизонтальной трубы вода течет со скоростью  $v = 50$  см/с. Определите скорость течения воды в узкой части трубы, если разность давлений в широкой и узкой частях  $\Delta P = 1,33$  кПа, плотность воды —  $1000$  кг/м<sup>3</sup>.

3. По горизонтальной трубке переменного сечения протекает вода. Статическое давление в точке  $x_0$  равно  $p_0 = 0,3$  Па, а скорость воды  $v_0 = 4$  см/с. Найдите статическое давление в точке  $x_1$ , если отношение сечений трубы  $S_{x_0}/S_{x_1} = 0,5$ , плотность воды —  $1000$  кг/м<sup>3</sup>.

4. Определите линейную скорость крови в аорте радиусом  $1,5$  см, если длительность систолы  $0,25$  с, ударный объем крови  $60$  мл.

## МЕХАНИКА СЕРДЕЧНОГО ВЫБРОСА. ПУЛЬСОВАЯ ВОЛНА, ЕЕ СКОРОСТЬ

Около 80–85 % общего объема циркулирующей крови находится в большом круге кровообращения, остальная часть — в малом (легочном).

Сердечный выброс (СВ) — это общее количество крови, выбрасываемой сердцем в единицу времени. Обычно выброс оценивают за 1 мин (минутный объем). Объем крови, выбрасываемый за одно сокращение, называется ударным объемом. Минутный объем равен ударному объему, помноженному на частоту сокращений сердца.

В среднем у взрослых СВ составляет 5 л/мин, варьируясь в зависимости от массы тела и конституции. Более точным показателем является сердечный индекс, равный сердечному выбросу (СВ), отнесенному к площади поверхности тела (в м<sup>2</sup>). У человека средней упитанности площадь поверхности тела составляет приблизительно 1,7 м<sup>2</sup>, а сердечный индекс соответственно равен 3 л/м<sup>2</sup>/мин.

Движение крови по венам обеспечивается рядом факторов: работой сердца, клапанным аппаратом вен, «мышечным насосом» и др. Вены верхних и нижних конечностей снабжены клапанами, а глубокие вены окружены мышцами. При физической нагрузке мышцы действуют как насосы, оказывая давление на вены снаружи. Чем чаще и активнее движения, например, при ходьбе, тем эффективнее «насосное действие» мышц. Правда, сокращение мышц, пережимая сосуды, затрудняет кровоток. Но если сокращения носят перемежающийся характер, то уменьшение кровотока во время фазы сокращения эффективно компенсируется за счет кислорода, связанного с миоглобином. Поэтому во время ритмичной нагрузки, возникающей при беге, ходьбе на лыжах, езде на велосипеде, кровоснабжение мышц конечностей намного увеличивается. Сокращение мышц брюшного пресса ведет к вытеснению значительного количества крови из сосудов печени, кишечника и селезенки, увеличивая приток крови к сердцу и тем самым влияя на сердечный выброс.

При сокращении мышц вены в них сжимаются, что немедленно приводит к увеличению притока крови к правому желудочку (мышечному насосу). Увеличение оттока венозной крови из мышц нижних конечностей способствует быстрому заполнению сердца и, кроме того, повышает давление перфузии в нижних конечностях за счет снижения давления в венах голени и ступни.

Активация мышечного насоса сопровождается изменениями в посткапиллярных сосудах (в основном в венах) системного кровообращения.

Физические упражнения вызывают рефлекторное увеличение напряжения стенок венозных сосудов как в работающих, так и в неработающих конечностях. Это напряжение сохраняется в течение всей нагрузки и пропорционально степени ее тяжести.

При сокращении сердечной мышцы (систола) кровь выбрасывается из сердца в аорту и отходящие от нее артерии. Если бы стенки этих сосудов были жесткими, то давление, возникающее в крови на выходе из сердца, со скоростью звука передалось бы к периферии. Упругость стенок сосудов приводит к тому, что во время систолы кровь, выталкиваемая сердцем, растягивает аорту, артерии и артериолы, т. е. крупные сосуды воспринимают за время систолы больше крови, чем ее оттекает к периферии. Систолическое давление человека в норме равно приблизительно 16 кПа. Во время расслабления сердца (диастола) растянутые кровеносные сосуды спадают, и потенциальная энергия, сообщенная им сердцем через кровь, переходит в кинетическую энергию тока крови, при этом поддерживается диастолическое давление, приблизительно равное 11 кПа.

Распространяющуюся по аорте и артериям волну повышенного давления, вызванную выбросом крови из левого желудочка в период систолы, называют *пульсовой волной*.

Пульсовая волна распространяется со скоростью 5–10 м/с и даже более. Следовательно, за время систолы (около 0,3 с) она должна распространиться на расстояние 1,5–3 м, что больше расстояния от сердца к конечностям. Это означает, что начало пульсовой волны достигнет конечностей раньше, чем начнется спад давления в аорте.

Пульсовой волне будет соответствовать пульсирование скорости кровотока в крупных артериях, однако скорость крови (максимальное значение 0,3–0,5 м/с) существенно меньше скорости распространения пульсовой волны.

Из модельного опыта и из общих представлений о работе сердца ясно, что пульсовая волна не является синусоидальной (гармонической). Как всякий периодический процесс пульсовая волна может быть представлена суммой гармонических волн.

Пульсовая волна является физиологическим феноменом, наблюдаемым в артериальной системе во время циркуляции крови. Одно сокращение сердца выталкивает определенный объем крови. Этот

объем движется по артериям благодаря обратной трансформации между кинетической энергией части объема вытолкнутой крови и потенциальной энергией растянутой части эластичных стенок сосудов. Мы можем наблюдать изменения давления, кровообращения, скорости и состояния во время распространения пульсовой волны. Она также может использоваться для определения эластичности стенок артерий.

Анализ скорости распространения пульсовой волны является классическим индексом артериальной жесткости и прогностическим фактором смертности в результате сердечно-сосудистых заболеваний у людей, страдающих гипертонией. Так как скорость распространения пульсовой волны в артериях с возрастом изменяется, этот показатель может быть крайне важным для определения риска развития сердечно-сосудистых заболеваний у пожилых людей.

Скорость пульсовой волны в крупных сосудах следующим образом зависит от их параметров (*формула Моенса–Кортевега*):

$$v = \sqrt{\frac{Eh}{\rho d}},$$

где  $E$  — модуль упругости;  $\rho$  — плотность вещества сосуда;  $h$  — толщина стенки сосуда;  $d$  — диаметр сосуда.

Скорость распространения пульсовой волны в артериях считается показателем риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, независимым от уровня кровяного давления, но связанным с сердечным ритмом. Так как показатель скорости распространения пульсовой волны повышается с возрастом, его анализ наиболее важен для пожилых людей (рис. 7).

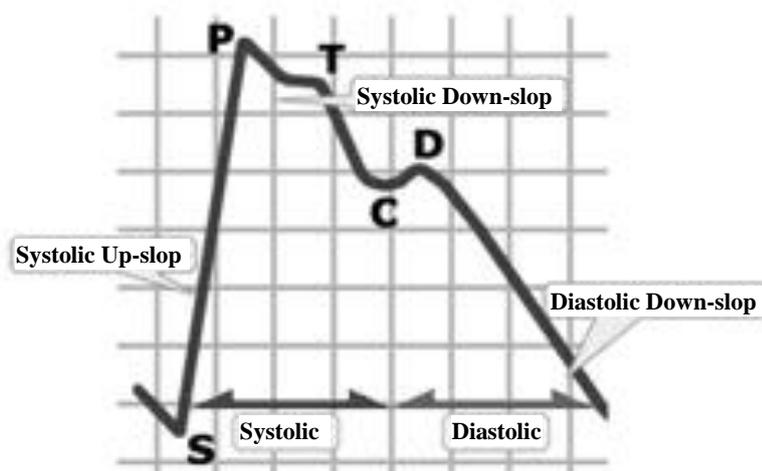


Рис. 7. Скорость распространения пульсовой волны

**S (начальная точка)** — начальная точка артериальной пульсовой волны. Клапан аорты открывается и из левого желудочка выпускается кровь.

**P (первая основная волна)** — волна, сформированная выпущенным из левого желудочка объемом крови.

**T (вторая дополнительная волна)** — волна, отраженная от мелких артерий.

**C (вырезка)** — заключительная точка систолической фазы, когда закрывается клапан аорты.

**D (дикротическая волна)** — отраженная колебательная волна, сформированная ударом крови (вызванным кровяным давлением аорты) о клапан аорты.

Анализ скорости распространения пульсовой волны — показатели артериальной жесткости — могут дать врачам дополнительные основания для начала лечения задолго до появления симптомов заболевания. Возраст и показатели систолического давления тесно связаны со скоростью распространения пульсовой волны. Основным фактором, влияющим на повышение скорости распространения пульсовой волны, является возраст, так как у пожилых людей наблюдается повышенная артериальная жесткость, вызванная кальцинозом и потерей эластичности. Повреждение крупных артерий является основным фактором, влияющим на высокие показатели заболеваемости и смертности от болезней сердечно-сосудистой системы. Пониженная эластичность артерий ведет к чрезмерному повышению систолического и пульсового давления в артериях, которое связано с повышением заболеваемости и смертности от болезней сердечно-сосудистой системы. Анализ пульсовой волны дает информацию о степени жесткости и эластичности артерий. Измерение скорости распространения пульсовой волны используется в исследованиях эффектов процесса старения, заболеваний сердечно-сосудистой системы, сосудосуживающих и сосудорасширяющих средств. В процессе атеросклероза стенки артерий становятся толще и жестче, а также сужается полость артерий. Чрезмерная жесткость стенок артерий повышает скорость распространения пульсовой волны, так как энергия пульсовых колебаний кровяного давления не может удерживаться в жестких стенках артерий. Состояние магистральных артерий является ключом к своевременному предупреждению и диагностированию болезней, связанных с нарушениями в работе сердечно-сосудистой системы. К примеру, жесткость стенок магистральных артерий является признаком потенциальных проблем

со здоровьем, таких как сердечные приступы, сердечная недостаточность, диабет и заболевания почек. Измерение скорости распространения пульсовой волны, например, с помощью системы VitalScan является простым дополнительным методом определения жесткости стенок магистральных артерий. Измерение скорости распространения пульсовой волны с помощью системы VitalScan — это 4-минутная неинвазивная процедура, во время которой пациент находится в состоянии покоя. С помощью этой эффективной процедуры можно провести дополнительное обследование относительного состояния здоровья магистральных артерий, а также наблюдать за эффективностью проводимого лечения, терапии или диеты.

### **Задачи**

1. Скорость пульсовой волны в некоторой артерии  $v = 10$  м/с. Чему равен модуль упругости  $E$  этого сосуда, если диаметр  $d$  просвета сосуда в 9 раз больше толщины его стенки? Плотность  $\rho$  вещества сосуда считать равной плотности воды —  $1000$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Определите кинетическую энергию минутного объема крови, протекающей со скоростью  $0,4$  м/с через артерию диаметром  $3$  мм, плотность крови  $\rho = 1,05 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

## **БИОФИЗИКА ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ**

### **ПЕРЕХОД ГАЗА ИЗ ОДНОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ. ИЗОПРОЦЕССЫ. ЛЕГОЧНОЕ ДЫХАНИЕ**

**Дыхание** — это единый процесс, осуществляемый целостным организмом и состоящий из трех неразрывных звеньев: а) внешнего дыхания, т. е. газообмена между внешней средой и кровью легочных капилляров; б) переноса газов, осуществляемого системами кровообращения; в) внутреннего (тканевого) дыхания, т. е. газообмена между кровью и клеткой, в процессе которого клетки потребляют кислород и выделяют углекислоту. Основу тканевого дыхания составляют сложные окислительно-восстановительные реакции, сопровождающиеся освобождением энергии, которая необходима для жизнедеятельности организма.

Работоспособность человека (в частности, спортсмена) определяется в основном тем, какое количество кислорода ( $O_2$ ) забрано из наружного воздуха в кровь легочных капилляров и доставлено в ткани

и клетки. Указанные выше три звена дыхания тесно связаны между собой и обладают взаимной компенсацией звена. Так, при сердечной недостаточности наступает одышка, при недостатке  $O_2$  в атмосферном воздухе (например, в среднегорье) увеличивается количество эритроцитов — переносчиков кислорода, при заболеваниях легких наступает тахикардия.

Эта система состоит из легких, верхних дыхательных путей и бронхов, грудной клетки и дыхательных мышц (межреберные, диафрагма и др.). Внешнее дыхание обеспечивает обмен газов между альвеолярным воздухом и кровью легочных капилляров, т. е. насыщение венозной крови кислородом и освобождение ее от избытка углекислоты, что свидетельствует о взаимосвязи функции внешнего дыхания с регуляцией кислотно-щелочного равновесия. В физиологии дыхания функцию внешнего дыхания разделяют на три основных процесса — вентиляцию, диффузию и перфузию (кровоток в капиллярах легких).

Самый важный для человека газ — это воздух. Земля окружена атмосферой — слоем воздуха, состоящего из смеси различных газов. Атмосфера удерживается около Земли силами тяготения и оказывает давление на все тела, которые она окружает. Масса атмосферы составляет около  $5 \cdot 10^{15}$  тонн. Давление воздуха на уровне моря во всех пунктах земной поверхности равно приблизительно  $10^5$  Па и меняется в зависимости от различных процессов, происходящих в атмосфере. Давление атмосферы убывает с высотой по нелинейному (экспоненциальному) закону. Это объясняется тем, что с ростом высоты уменьшается не только вес столба воздуха, но и его плотность. Данная зависимость описывается барометрической формулой

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}},$$

где  $p_0$  — давление атмосферы на нулевом уровне (на уровне моря) ( $h = h_0$ );  $p$  — давление на высоте  $h$ ;  $M$  — молярная масса воздуха ( $M = 0,029$  кг/моль);  $g$  — ускорение свободного падения;  $T$  — абсолютная температура воздуха, К ( $T = t + 273,15$ , где  $t$  — температура, выражаемая в градусах Цельсия, °С);  $R$  — универсальная газовая постоянная ( $R = 8,31$  Дж/моль·К). Атмосферное давление измеряют при помощи барометров.

Во всех органах и клетках постоянно происходит разрушение углеводов, белков и жиров, причем распад этих веществ почти всегда связан с окислением. При окислении поглощается кислород и образу-

ется углекислый газ. Обмен этими газами между организмом и окружающей средой происходит в легких при дыхании.

При вдохе, когда грудная клетка расширяется, воздух «засасывается» в легкие. Сначала вдыхаемый воздух поступает в носовую полость, где согревается, увлажняется и очищается от пыли; поэтому очень важно дышать носом, а не ртом. Затем воздух переходит в носоглотку и гортань. Продолжением гортани служит дыхательное горло — трахея, которая представляет собой трубку длиной примерно 12 см. От трахеи отходят еще две трубки — главные бронхи, идущие к обоим легким. В этих дыхательных путях выделяется слизь, которая задерживает поступающую с воздухом пыль. Кроме того, в гортани, трахее и бронхах имеются мерцательные реснички, своими постоянными движениями способствующие удалению пыли и других посторонних частиц.

Бронхи разветвляются в легких на более мелкие трубочки, заканчивающиеся тонкостенными легочными пузырьками, или альвеолами. Количество их достигает нескольких миллионов. В них и попадает, в конечном счете, воздух. Во время каждого вдоха при спокойном дыхании до легочных альвеол доходит 300–400 мл воздуха. При усиленном дыхании в легкие поступает воздуха в несколько раз больше.

Легочные пузырьки оплетены многочисленными капиллярами — мельчайшими кровеносными сосудами, которые можно видеть только с помощью микроскопа. Толщина стенки легочных пузырьков и легочных капилляров измеряется ничтожными долями миллиметра. Молекулы кислорода легко проникают из воздуха, содержащегося в легочных пузырьках, в кровь, поэтому выдыхаемый воздух содержит около 17 % кислорода, т. е. на 4 % меньше, чем вдыхаемый воздух.

В легких происходит газообмен кислородом, углекислым газом и азотом между организмом и внешней средой. Структурной единицей легкого, в которой происходит этот газообмен, является альвеола. В легких примерно 300 миллионов альвеол, общая поверхность которых достигает 70–80 м<sup>2</sup>. Диаметр альвеол составляет всего 75–300 мкм, поверхностное натяжение альвеолярных мембран, выстилающих их изнутри, создает добавочное давление Лапласа, стремящееся уменьшить размер альвеол. При вдохе объем альвеол увеличивается благодаря работе дыхательных мышц, давление в них становится ниже атмосферного и это способствует их заполнению воздухом. После выдоха объем альвеол уменьшается, добавочное давление в них увеличивается, что должно было бы сильнее уменьшить размер альвеол

и препятствовало бы следующему акту вдоха. Этого не происходит благодаря специальному веществу — сурфактанту, покрывающему внутреннюю поверхность альвеол. Сурфактант существенно снижает поверхностное натяжение альвеолярных стенок, причем его коэффициент поверхностного натяжения зависит от толщины пленки: на вдохе она тоньше, так как поверхность альвеолы больше,  $a = 0,05$  Н/м, а на выдохе эта пленка толще и коэффициент поверхностного натяжения сурфактанта снижается в 10–50 раз, принимая значения  $a = 0,005–0,001$  Н/м, поэтому снижается и добавочное давление в альвеолах, обеспечивая возможность последующего вдоха. Таким образом, именно наличие сурфактанта с его уникальными поверхностными свойствами препятствует полному схлопыванию альвеол и обеспечивает возможность дыхания.

Следовательно, в легких кровь обогащается кислородом. Одновременно из крови в воздух легочных альвеол поступает углекислый газ. Если во вдыхаемом воздухе имеются лишь следы углекислого газа (0,03 %), то в выдыхаемом воздухе его содержится около 3,5 %. Кроме того, за сутки через легкие выделяется из организма около 0,3–0,4 л воды. В выдыхаемом воздухе всегда много водяных паров. Поэтому в холодный день во время выдоха видны клубы водяных паров около ноздрей и рта. Эти водяные пары, попав из теплых легких в холодную атмосферу, превращаются в мелкие капельки воды. То же происходит, если дышать на холодное стекло: на нем появляется налет влаги, оно «запотевает».

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ И ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМ**

### **ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА КЛЕТОЧНЫХ МЕМБРАН.**

#### **Природа биопотенциалов**

В настоящее время можно говорить о нескольких видах моделей клеточной мембраны, среди которых наибольшее распространение получила жидкостно-мозаичная модель. Согласно этой модели, мембрана представлена бислоем фосфолипидных молекул, ориентированных таким образом, что гидрофобные концы молекул находятся внутри бислоя, а гидрофильные направлены в водную фазу. Такая структура идеально подходит для образования раздела двух фаз: вне- и внутриклеточной. Схема строения биологической мембраны представлена на рис. 8.

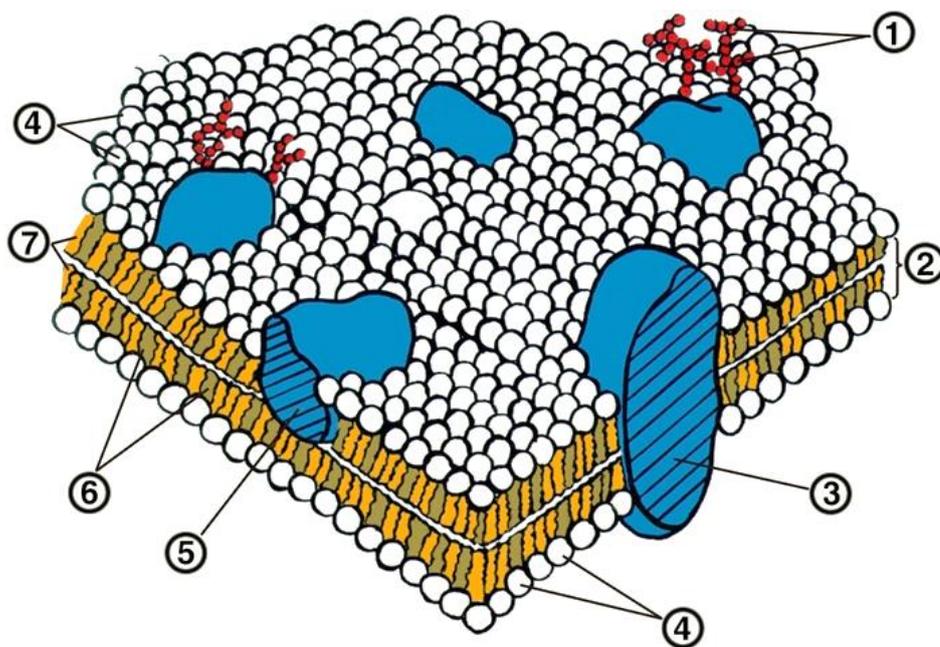


Рис. 8. Схема строения биологической мембраны:

1 — углеводные фрагменты гликопротеидов (расположены на внешней стороне и в состав мембраны не входят); 2 — липидный бислой; 3 — интегральный белок; 4 — «головки» фосфолипидов; 5 — периферический белок; 6 — холестерин; 7 — жирнокислотные «хвосты» фосфолипидов

В фосфолипидном бислое интегрированы глобулярные белки, полярные участки которых образуют гидрофильную поверхность в водной фазе. Эти интегрированные белки выполняют различные функции, в том числе рецепторную, ферментативную, образуют ионные каналы, являются мембранными насосами и переносчиками ионов и молекул. Некоторые белковые молекулы свободно диффундируют в плоскости липидного слоя; в обычном состоянии части белковых молекул, выходящие по разные стороны клеточной мембраны, не изменяют своего положения.

**Электрические характеристики мембран.** Представленная жидкостно-мозаичная модель клеточных мембран определяет их электрические характеристики, среди которых наиболее важными являются проводимость и емкость.

Емкостные свойства биологической мембраны определяются как наличием фосфолипидного бислоя, который непроницаем для гидратированных ионов и в то же время достаточно тонок, чтобы обеспечивать эффективное разделение и накопление зарядов и электростатическое взаимодействие катионов и анионов, так и наличием трансмембранного биопотенциала — разности потенциалов на внутренней и наружной сторонах, величина которого в состоянии покоя

составляет  $\approx -60-90$  мВ. Емкостные свойства мембран являются одной из причин, определяющих временные характеристики протекающих на них электрических процессов. Таким образом, биомембрана — плоский конденсатор, емкостные свойства определяются фосфолипидным бислоем, который обеспечивает эффективное разделение и накопление зарядов и электростатическое взаимодействие катионов и анионов посредством электрического поля. Емкостные свойства мембраны как конденсатора составляют  $0,5-1,3$  мкФ $\times$ см $^{-2}$ , а с учетом малой толщины мембраны  $d \approx 8-9$  нм напряженность электрического поля  $E$ , рассчитываемая как отношение потенциала покоя к толщине мембраны ( $E = \text{ПП}/d$ ), достигает  $6-9 \times 10^6$  В/м.

Проводимость биомембраны определяется отношением величины общего трансмембранного тока для данного иона к величине, обусловившей его трансмембранной разности потенциалов.

Через бислой фосфолипидов диффундируют различные вещества, и степень проницаемости ( $P$ ), т. е. способность клеточной мембраны пропускать эти вещества, зависит от разности концентраций диффундирующего вещества по обе стороны мембраны, его растворимости в липидах и свойств клеточной мембраны. Скорость диффузии для заряженных ионов в условиях постоянного поля в мембране определяется подвижностью ионов, толщиной мембраны, распределением ионов в мембране. Для неэлектролитов проницаемость мембраны не влияет на ее проводимость, поскольку неэлектролиты не несут зарядов, т. е. не могут переносить электрический ток.

Проводимость мембраны является мерой ее ионной проницаемости. Увеличение проводимости свидетельствует об увеличении количества ионов, проходящих через мембрану.

**Биопотенциалы** (любые разности потенциалов в живых системах) — разность потенциалов между клеткой и окружающей средой; между возбужденным и невозбужденным участками клетки; между участками одного организма, находящимися в разных физиологических состояниях.

**Разность потенциалов** (*электрический градиент*) — характерная черта всего живого.

#### **Виды биопотенциалов:**

1. *Потенциал покоя* (ПП) — постоянно существующая в живых системах разность потенциалов, характерная для стационарного состояния системы. Он поддерживается постоянно протекающими звеньями обмена веществ.

2. *Потенциал действия* (ПД) — быстро возникающая и вновь исчезающая разность потенциалов, характерная для переходных процессов.

Биопотенциалы тесно связаны с метаболическими процессами, следовательно, являются *показателями физиологического состояния системы*. Величина и характер биопотенциалов являются показателями изменений в клетке в норме и патологии.

Существует большая группа *электрофизиологических методов диагностики*, основанных на регистрации биопотенциалов (ЭКГ, ЭМГ и т. д.).

В основе возникновения биопотенциалов лежит несимметричное относительно мембраны распределение ионов, т. е. различные концентрации ионов по разные стороны мембраны. *Непосредственная причина* — различная скорость диффузии ионов по их градиентам, определяющаяся селективностью мембраны.

**Биопотенциалы** — ионные потенциалы, преимущественно мембранной природы — это основное положение **мембранной теории биопотенциалов** (Бернштейн, Ходжкин, Катц).

В состоянии покоя клетка проницаема главным образом для ионов калия. Они диффундируют по градиенту концентрации через клеточную мембрану из клетки в окружающую жидкость. Крупные органические анионы, содержащиеся в клетке, не могут преодолеть мембрану. Таким образом, внешняя поверхность мембраны заряжается положительно, а внутренняя — отрицательно.

Изменение зарядов и разности потенциалов на мембране продолжается, пока силы, обуславливающие градиент концентрации калия, не уравновесятся силами возникающего электрического поля, следовательно, не будет достигнуто стационарное состояние системы.

Разность потенциалов на мембране  $\phi_i - \phi_e$  в этом случае и есть **потенциал покоя**.

Вторая причина возникновения потенциала покоя — электрогенность калий-натриевого насоса.

**Теоретическое определение потенциала покоя.** При учёте лишь калиевой (с учетом свободных электронов, участвующих в процессе) валентности иона калия  $Z_K$ , равной проницаемости мембраны в состоянии покоя, потенциал покоя можно вычислить по *уравнению Нернста*. Потенциал межклеточной жидкости принимают равным нулю:  $\phi_e = 0$ . Поэтому мембранный потенциал покоя всегда равен потенциалу внутри клетки:  $\text{ПП} = \phi_m = \phi_i$ .

$$\varphi_i = \varphi_i - \varphi_e = -\frac{RT}{F} \cdot \ln \frac{C_{iK}}{C_{eK}},$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $F$  — число Фарадея;  $C_{iK}$  — концентрация калия внутри клетки;  $C_{eK}$  — концентрация калия снаружи клетки.

На самом деле, помимо ионов калия, клеточная мембрана проницаема также и для ионов натрия и хлора, однако в меньшей степени. Если градиент натрия поступает внутрь клетки, то мембранный потенциал уменьшается. Если градиент хлора поступает внутрь клетки, то мембранный потенциал увеличивается.

Если учесть диффузию всех ионов и считать электрическое поле однородным по всей толщине мембраны, то потенциал покоя возможно будет рассчитать по уравнению Гольдмана, Ходжкина, Катца:

$$\varphi_M = -\frac{RT}{F} \ln \frac{P_K C_i(K^+) + P_{Na} C_i(Na^+) + P_{Cl} C_e(Cl^-)}{P_K C_e(K^+) + P_{Na} C_e(Na^+) + P_{Cl} C_i(Cl^-)},$$

где  $P$  — проницаемость мембраны для данного иона;  $C_i$  — концентрация иона внутри клетки;  $C_e$  — концентрация иона снаружи клетки.

#### **Условия возникновения и фазы потенциала действия.**

**Раздражители** — внешние или внутренние факторы, действующие на клетку.

При действии раздражителей на клетку меняется электрическое состояние клеточной мембраны. Потенциал действия возникает лишь при действии раздражителя достаточной силы и длительности.

**Пороговая сила** — минимальная сила раздражителя, необходимая для инициации потенциала действия. Раздражители большей силы — **надпороговые**; меньшей силы — **подпороговые**. Пороговая сила раздражителя находится в обратной зависимости от его длительности в определённых пределах.

Если у раздражителя надпороговой или пороговой силы на участке раздражения возникает электрический импульс характерной формы, распространяющийся вдоль всей мембраны, то возникнет **потенциал действия** (рис. 1).

В составе ПД различают четыре фазы: 1 — деполяризация, исчезновение заряда клетки — уменьшение мембранного потенциала до нуля; 2 — овершут (пиковый потенциал, спайк, инверсия) — изменение заряда клетки на противоположный, когда внутренняя сторона мембраны клетки заряжается положительно, а внешняя — отрицательно,

доходя до максимального значения, и начало обратного процесса; 3 — реполяризация, восстановление исходного заряда клетки, когда внутренняя поверхность клеточной мембраны снова заряжается отрицательно, а наружная — положительно; 4 — следовая гиперполяризация.

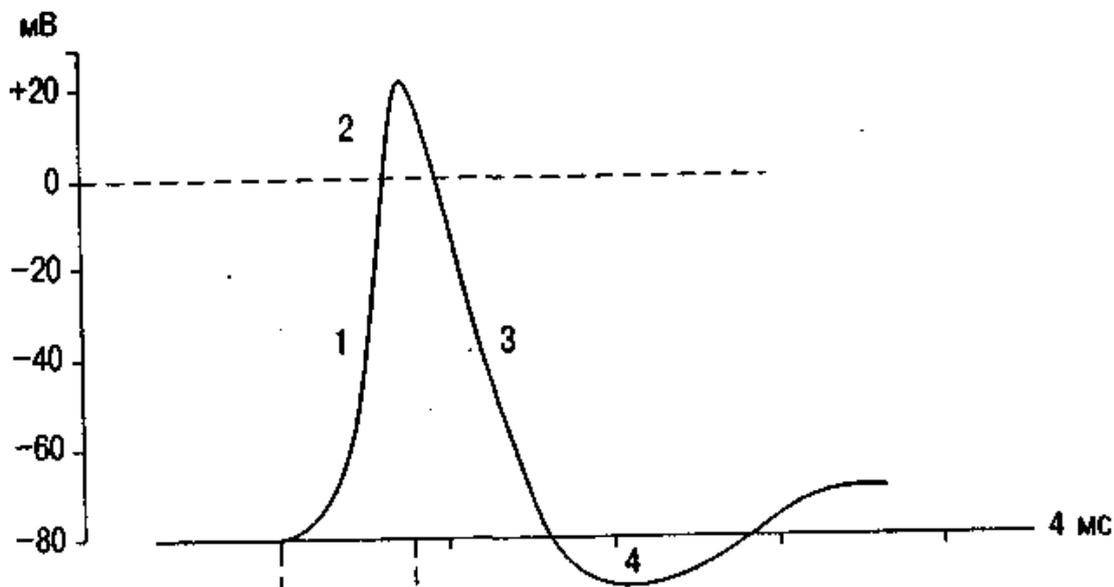


Рис. 9. Схематический потенциал действия

Потенциал действия — результат изменения ионной проницаемости мембраны. Проницаемость мембраны для ионов натрия — непосредственная функция мембранного потенциала. Если мембранный потенциал понижается, то натриевая проницаемость возрастает.

Действие порогового раздражителя: уменьшение мембранного потенциала до критической величины (критическая деполяризация мембраны) → резкое повышение натриевой проницаемости → усиленный приток натрия в клетку по градиенту → дальнейшая деполяризация мембраны → процесс заклинивается → включается механизм положительной обратной связи. Усиленный приток натрия в клетку вызывает перезарядку мембраны и окончание фазы деполяризации. Положительный заряд на внутренней поверхности мембраны становится достаточным для уравнивания градиента концентрации ионов натрия. Усиленное поступление натрия в клетку заканчивается, следовательно, заканчивается фаза деполяризации. Экспериментальные данные, проведенные на аксоне гигантского кальмара, взятого в качестве эталонного биоматериала, показали следующие соотношения проницаемостей мембраны аксона для основных ионов: в состоянии покоя —  $PK^+ : PNa^+ : PCl^- = 1 : 0,04 : 0,45$ , в фазе деполяризации —  $PK^+ : PNa^+ : PCl^- = 1 : 20 : 0,45$ . Видно, что в процессе фазы деполяри-

зации проницаемость мембраны для ионов калия и хлора не меняется, а для ионов натрия возрастает в 500 раз.

Фаза реполяризации: увеличивается проницаемость мембраны для ионов калия → усиленный выход ионов калия из клетки по градиенту концентрации → уменьшение положительного заряда на внутренней поверхности мембраны, обратное изменение мембранного потенциала → уменьшение натриевой проницаемости → обратная перезарядка мембраны → уменьшение калиевой проницаемости, замедление оттока калия из клетки.

К концу фазы реполяризации происходит восстановление потенциала покоя. Мембранный потенциал и проницаемость мембраны для ионов калия и натрия возвращается к уровню покоя.

Фаза гиперполяризации возникает, если проницаемость мембраны для ионов калия ещё повышена, а для ионов натрия уже вернулась к уровню покоя.

Потенциал действия формируется двумя потоками ионов через мембрану. Поток ионов натрия внутрь клетки → перезарядка мембраны. Поток ионов калия наружу → восстановление потенциала покоя. Потоки почти одинаковы по величине, но сдвинуты по времени.

Диффузия ионов через клеточную мембрану в процессе генерации потенциала действия осуществляется по каналам, которые являются высокоселективными, т. е. они обладают большей проницаемостью для данного иона (открытие для него дополнительных каналов).

При генерации потенциала действия клетка приобретает определённое количество натрия и теряет определённое количество калия. Выравнивание концентраций этих ионов между клеткой и средой не происходит благодаря работе калий-натриевого насоса.

### **Задачи**

1. При каком соотношении концентраций равновесный мембранный потенциал Нернста для ионов натрия составит +40 мВ при температуре 37 °С?

2. Определите равновесный мембранный потенциал Нернста, создаваемый на мембране ионами калия при температуре 37 °С, если концентрация калия с внутренней стороны мембраны равна  $10^{-2}$  М/л, а с наружной —  $10^{-4}$  М/л.

3. Потенциал покоя на мембране равен –70 мВ при температуре 37 °С. Полагая, что он имеет чисто калиевую природу, рассчитайте концентрацию ионов калия внутри нерва, если снаружи она составляет 10 мМ/л.

4. Потенциал покоя клетки составляет 96 мВ. Найдите напряженность электрического поля внутри мембраны, если ее толщина равна  $d = 8$  нм.

### ДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

Как уже говорилось, электрический ток представляет собой направленное движение электрически заряженных частиц под действием электрического поля. Ткани человека имеют разную электропроводность в зависимости от содержания ионов (табл. 5). Спинномозговая жидкость, лимфа, желчь, моча, кровь, а также мышцы и паренхиматозные органы хорошо проводят ток (имеют низкое сопротивление). Жировая ткань и сухая кожа плохо проводят ток. Худшие проводники — эмаль зуба и кость. В основном ток проходит в ткани через протоки потовых и сальных желез кожи. Электропроводность кожи в основном зависит от состояния ее эпидермиса. Сухая кожа, особенно с ороговевшим эпидермисом, почти не проводит электричество. Гиперемия, отек (особенно эпидермального слоя) значительно увеличивают электропроводность кожи.

Таблица 5

Удельное сопротивление некоторых биологических систем

Ткань	$\rho$ , Ом·м
Спинномозговая жидкость	$5,5 \cdot 10^{-1}$
Сыворотка крови	$7,1 \cdot 10^{-1}$
Мышечная ткань	2,01
Печень	10
Нервная ткань	25
Жировая ткань	50
Сухая кожа	$10^2$
Кость без надкостницы	$10^6$
Эритроциты	$10^6$

Из-за разного сопротивления тканей направление распространения тока (линий тока) не всегда совпадает с кратчайшим расстоянием между электродами. Иногда линии тока могут захватывать и ткани с наименьшим сопротивлением.

Особенностью эффекта постоянного тока является направленное движение положительных и отрицательных ионов, а также других заряженных частиц в тканях тела, находящихся между электродами. Отрицательные ионы движутся к положительному полюсу источника

постоянного тока, а положительно заряженные ионы движутся к отрицательному полюсу.

Основные физиотерапевтические процедуры, использующие постоянный ток, — это гальванизация и электрофорез.

Гальванизация — лечебное воздействие на организм постоянным электрическим током невысокого напряжения и небольшой силы. В результате гальванизации в тканях активизируются системы регуляции локального кровотока. При гальванизации различных участков тела используются значения токов, приведенные в табл. 6.

*Таблица 6*

**Значения токов, используемых при гальванизации некоторых участков тела**

Участок	Конечности	Туловище	Лицевая область	Слизистые
Сила тока, мА	20–30	15–20	3–5	2–3

Электрофорез — введение лекарственного вещества через кожу или слизистые оболочки с помощью постоянного тока. Для этого под соответствующий электрод кладут прокладки, смоченные лекарственным препаратом. Лекарство вводят с того полюса, зарядом которого обладают его ионы. Через катод вводят анионы (йод, гепарин, бром), а через анод — катионы (Na, Ca, новокаин).

### **ДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (НЧ, ЗЧ, УЗЧ) НА ЧЕЛОВЕКА**

Переменный ток проводимости представляет собой колебательные движения ионов. Действие, которое оказывает на организм переменный (синусоидальный) ток, зависит от частоты и амплитуды тока. В медицине принята следующая классификация частот переменного тока (табл. 7).

*Таблица 7*

**Классификация частот переменного тока**

Название диапазона	Низкочастотный (НЧ)	Звуковой (ЗЧ)	Ультразвуковой (УЗЧ)	Высокочастотный (ВЧ)
Частота, кГц	Ниже 0,02	0,02–20	20–200	200–30 000

Как и постоянный ток, переменный ток оказывает на ткани организма раздражающее действие. Возбуждение нервной и мышечной тканей постоянным или переменным током (с частотой ниже 100 кГц) может стать причиной электротравмы (табл. 8).

**Характер воздействия постоянного и переменного тока разного значения  
на организм человека**

Ток через тело человека, мА	Характер воздействия	
	Переменный ток 50–60 Гц	Постоянный ток
0,6–1,5	Начало ощущения, легкое дрожание пальцев, слабый зуд, пощипывание кожи	Не ощущается
2,0–4,0	Ощущение распространяется на запястье, слегка сводит руки, сильное дрожание пальцев	Не ощущается
5,0–7,0	Болевые ощущения усиливаются и сопровождаются судорогами во всей руке	Начало ощущения. Зуд, ощущение нагрева
8,0–10,0	Сильные боли и судороги во всей руке. Руки трудно, но еще можно оторвать от электродов	Усиление ощущения нагрева
10–15	Едва переносимые боли. Руки невозможно оторвать от электродов	Большее усиление нагрева
20–25	Паралич рук. Оторвать их от электродов невозможно. Очень сильные боли, дыхание затруднено	Еще большее усиление ощущения нагрева. Незначительное сокращение мышц
25–50	Очень сильная боль в руках и груди. Дыхание крайне затруднено. Возможны паралич дыхания и потеря сознания	Ощущение сильного нагрева, боли и судороги в руках. Едва переносимые боли при отрыве от электродов
50–80	Остановка дыхания. Нарушение работы и начало фибрилляции сердца	Ощущение очень сильного нагрева, сильные боли во всей руке и груди. Затруднение дыхания, судороги. Руки невозможно оторвать от электродов из-за сильных болей при отрыве
90–100	Фибрилляция сердца. Остановка дыхания через 2–3 с. Остановка сердца	Остановка дыхания при длительном протекании тока
300	То же действие за меньшее время	Фибрилляция сердца и остановка дыхания через 2–3 с
Более 5000	Немедленная остановка дыхания и сердца. При длительном протекании тока (несколько секунд) тяжелые ожоги, разрушение тканей	

При воздействии переменного и постоянного тока в зависимости от его величины можно выделить следующие пороговые значения:

1. **Порог ощущения** (ощутимый ток) — электрический ток, вызывающий при прохождении через организм ощутимые раздражения (0,5–1,5 мА для переменного и 5–7 мА для постоянного).

2. **Порог неотпускающего тока** (неотпускающий ток) — минимальное значение тока, при котором человек уже не может самостоятельно освободиться от захваченных электродов действием тех мышц, через которые проходит ток (10–15 мА для переменного и 50–80 мА для постоянного). Токи меньшей величины называют отпускающими.

3. **Порог фибрилляционного тока** (фибрилляционный ток) — электрический ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца (100 мА – 5 А для переменного и 300 мА – 5 мА для постоянного).

С токами НЧ- и ЗЧ-диапазонов врач встречается не только как с травмирующим фактором. Их применяют для электродиагностики (определение степени повреждения тканей по изменению их электрических свойств) и электростимуляции (восстановление деятельности органов и тканей, утративших нормальную функцию) биологических систем. Как правило, в этих целях используют не синусоидальные, а импульсные токи.

На частотах выше 200 кГц полностью исчезает раздражающее действие переменного тока. Основной первичный эффект в этом случае — воздействие тепла. Прогревание тканей токами высокой частоты применяют, например, при диатермии.

Диатермия — это метод лечения, при котором на тело воздействует высокочастотный переменный ток большой силы, что приводит к повышению температуры тканей. Высокочастотные токи также используются в хирургии. Диатермокоагуляция — прижигание, «сварка» тканей. Диатермотомия — рассечение ткани с помощью электрода в форме лезвия, при котором производится узкий равномерный разрез без капиллярного кровотечения.

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН РАДИОДИАПАЗОНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА**

Радиоволны охватывают диапазон шкалы электромагнитных волн от миллиметров до нескольких километров.

Длинные и средние радиоволны ( $\lambda > 100$  м) практически не взаимодействуют с биологическими объектами. В медицинских целях они не используются.

С уменьшением длины волны биологическое воздействие радиоволн усиливается. Волны СВЧ-диапазона заметно поглощаются биологическими тканями. Физиотерапевтические методы, которые основаны на применении электромагнитных волн, в зависимости от длины волны получили названия: СМВ-терапия (сантиметровая,  $\lambda = 12,6$  см) и ДМВ-терапия (дециметровая,  $\lambda = 65$  см). Особенно эффективно поглощают такие волны ткани со значительным содержанием воды, что приводит к их сильному нагреванию.

### Вопросы и задачи

1. Чем различаются гальванизация и электрофорез?
2. Определите напряжённость поля в мембране эритроцита толщиной  $200 \text{ \AA}$  (ангстрем:  $\text{\AA} = 10^{-10}$  м) при напряжении на мембране 100 мВ.
3. Постоянный ток  $I = 0,05$  А представляет опасность для жизни человека. Определите минимальную величину напряжения, при котором ток может достигнуть этого значения, если сопротивление тела человека в зависимости от условий изменяется от 1000 до 100 000 Ом.
4. Сопротивление живой ткани постоянному току в цепи между электродами при гальванизации составляет 2000 Ом при силе тока 0,01 А. Определите напряжение, которое обеспечивает аппарат гальванизации (аппарат гальванизации служит для лечения путем воздействия постоянным током).
5. Электроёмкость человека можно считать равной ёмкости сферы (шара) радиусом 30 см. Определите потенциал, до которого зарядится человек, если ему сообщить заряд  $10^{-7}$  Кл.

*Примечание:* ёмкость шара  $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$ , где  $r$  — радиус шара;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная.

6. Дефибриллятор — прибор для восстановления сокращений (работы) сердца, которое остановилось или фибриллирует (беспорядочно сокращаются мышечные волокна сердца). В схеме прибора имеются два параллельно соединённых конденсатора ёмкостью 8 мкФ. Определите заряд батареи из двух конденсаторов и среднюю мощность разряда, если разряд происходит за время 10 мс. Напряжение на батарее 5000 В.

*Примечание:* общая ёмкость батареи  $C_0$  из двух одинаковых ёмкостей  $C_1=C_2=C$  равна:  $C_0 = \frac{C}{2}$ . Средняя мощность батареи:  $P_{\text{ср}} = \frac{P}{2}$ .

7. От каких основных параметров переменного тока зависит его воздействие на организм?

8. Что такое диатермотомия?

## ОПТИКА ГЛАЗА

### СТРОЕНИЕ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА. ГЛАЗ КАК СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА

Мы ограничимся рассмотрением лишь самых основных элементов глаза. Они показаны на рис. 10 (правый глаз, вид сверху).

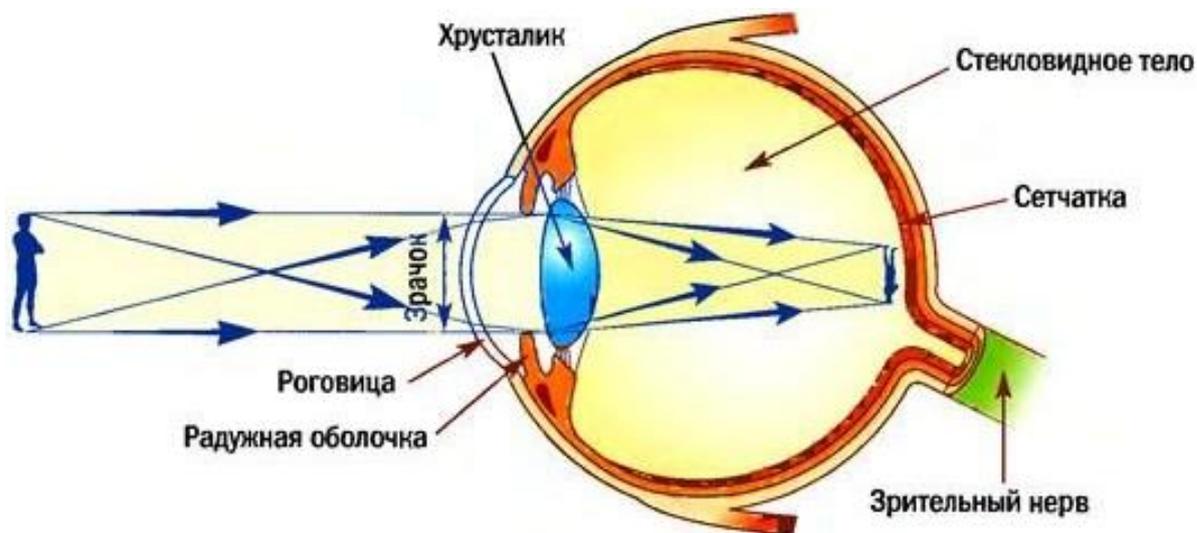


Рис. 10. Строение глаза<sup>1</sup>

Лучи, идущие от объекта (в данном случае фигуры человека), попадают на *роговицу* — переднюю прозрачную часть защитной оболочки глаза. Преломляясь в роговице и проходя сквозь *зрачок* (отверстие в *радужной оболочке* глаза), лучи вторично преломляются в *хрусталике*. Хрусталик представляет собой собирающую линзу с переменным фокусным расстоянием; он может менять свою кривизну (и тем самым фокусное расстояние) под действием специальной глазной мышцы.

<sup>1</sup> Изображение заимствовано с сайта «Детская энциклопедия What This».

Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза — сетчатке, образуя на ней обратное уменьшенное изображение (мозг «переворачивает» обратное изображение, и оно воспринимается как прямое).

Способность глаза отчетливо видеть предметы на различных расстояниях называется *аккомодацией*. При аккомодации кривизна хрусталика меняется так, что изображение предмета всегда оказывается на сетчатке. Представьте себе, что вы смотрите на человека, который приближается к вам. Вы все время четко его видите. Как это делает глаз?

Чтобы лучше понять это, давайте вспомним формулу линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

где  $d$  — это расстояние от глаза до предмета;  $f$  — расстояние от хрусталика до сетчатки,  $F$  — фокусное расстояние оптической системы глаза. Величина  $f$  — это геометрическая характеристика глаза, она неизменна. Следовательно, чтобы формула линзы оставалась справедливой, вместе с расстоянием  $d$  до разглядываемого объекта должно меняться и фокусное расстояние  $F$ .

Например, если объект приближается, то  $d$  уменьшается, поэтому и  $F$  должно уменьшаться. Для этого глазная мышца деформирует хрусталик, делая его более выпуклым, тем самым уменьшая фокусное расстояние до нужного значения. С другой стороны, когда объект удаляется, кривизна хрусталика уменьшается, а фокусное расстояние возрастает.

Аккомодация глаза происходит бессознательно и очень быстро. Эластичный хрусталик может изменять свою кривизну в определённых пределах. *Область аккомодации* — диапазон расстояний, на которых глаз способен чётко видеть объекты. Этот диапазон имеет границы — дальнюю и ближнюю точки аккомодации (рис. 11).

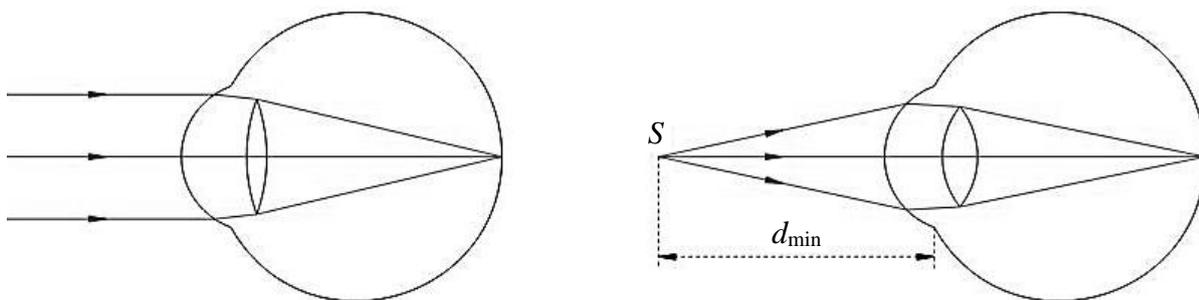


Рис. 11. Дальняя и ближняя точки аккомодации нормального глаза

*Дальняя точка аккомодации* (дальняя точка четкого видения) — это точка, в которой находится объект, изображение которого получается на сетчатке при расслабленной глазной мышце, то есть когда хрусталик не деформирован.

*Ближняя точка аккомодации* (ближняя точка четкого видения) — это точка, в которой находится объект, изображение которого получается на сетчатке при наибольшем напряжении глазной мышцы, то есть при максимально возможной деформации хрусталика.

Дальняя точка аккомодации нормального глаза находится на бесконечности: в расслабленном состоянии глаз фокусирует параллельные лучи на сетчатке (рис. 11, слева). Другими словами, *фокусное расстояние оптической системы нормального глаза при недеформированном хрусталике равно расстоянию от хрусталика до сетчатки.*

Ближняя точка аккомодации нормального глаза расположена на расстоянии  $d_{\min}$  от него (рис. 11, справа; хрусталик максимально деформирован). Это расстояние с возрастом увеличивается. Так, у десятилетнего ребёнка  $d_{\min} \approx 7$  см; в возрасте 30 лет  $d_{\min} \approx 15$  см; к 45 годам ближняя точка аккомодации находится уже на расстоянии 20–25 см от глаза.

Минимальное расстояние, на котором глаз может аккомодировать без утомления, называется расстоянием наилучшего зрения. Для нормального глаза оно соответствует 25 см.

Напомним, что фокусное расстояние нормального глаза в ненапряженном состоянии равно расстоянию от оптического центра до сетчатки. Нормальный глаз фокусирует параллельные лучи на сетчатке и поэтому может четко видеть удаленные предметы, не испытывая напряжения.

### **БЛИЗОРУКОСТЬ И ДАЛЬНОЗОРКОСТЬ. ИСПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ЗРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОЧКОВ**

**Близорукость** (рис. 12) — это дефект зрения, при котором фокусное расстояние расслабленного глаза меньше расстояния от оптического центра до сетчатки. Такой глаз фокусирует параллельные лучи перед сетчаткой, и это делает изображение далеких объектов размытым.

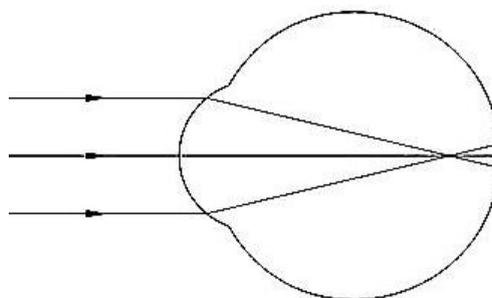


Рис. 12. Близорукость

Когда предмет находится за дальней точкой аккомодации, происходит потеря четкости. Таким образом, если у человека с нормальным зрением дальняя точка аккомодации находится на бесконечности, то у близорукого человека дальняя точка аккомодации расположена на конечном расстоянии перед ним. Соответственно, ближняя точка аккомодации у близорукого глаза находится ближе, чем у нормального. Расстояние наилучшего зрения для близорукого человека меньше 25 см. Близорукость корректируют очками с рассеивающими линзами. Проходя через такую линзу, параллельные лучи расходятся, в результате чего изображение бесконечно удалённой точки переносится на сетчатку (рис. 13). Если при этом мысленно продолжить расходящиеся лучи, попадающие в глаз, то они соберутся в дальней точке аккомодации.

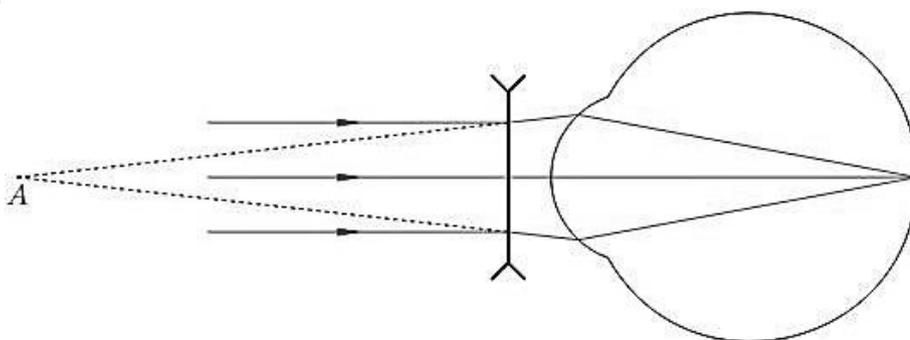


Рис. 13. Коррекция близорукости с помощью очков

Близорукий глаз, вооружённый подходящими очками, воспринимает параллельный пучок света как исходящий из дальней точки аккомодации (рис. 13). Вот почему близорукий человек в очках может отчётливо рассматривать удалённые предметы без напряжения в глазах. Из рис. 13 мы также видим, что фокусное расстояние подходящей линзы равно расстоянию от глаза до дальней точки аккомодации.

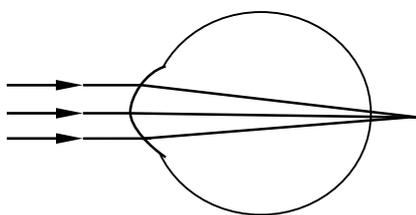


Рис. 14. Дальнозоркость

**Дальнозоркость** (рис. 14) — это дефект зрения, при котором фокусное расстояние расслабленного глаза больше расстояния от оптического центра до сетчатки. Дальнозоркий глаз фокусирует параллельные лучи за сетчаткой, поэтому изображения удалённых объектов размыты.

На сетчатке же фокусируется сходящийся пучок лучей. Поэтому дальняя точка аккомодации дальнозоркого глаза оказывается мнимой: в ней пересекаются мысленные продолжения лучей сходящегося пучка, попадающего на глаз. Ближняя точка аккомодации у дальнозоркого

глаза расположена дальше, чем у нормального. Расстояние наилучшего зрения для дальновзоркого человека больше 25 см.

После преломления параллельные лучи идут так, что их продолжения пересекаются в дальней точке аккомодации А (рис. 15). Поэтому дальновзоркий человек, вооружённый соответствующими очками, будет отчётливо и без напряжения рассматривать удалённые предметы. Из рис. 15 видно, что фокусное расстояние подходящей линзы равно расстоянию от глаза до мнимой дальней точки аккомодации.

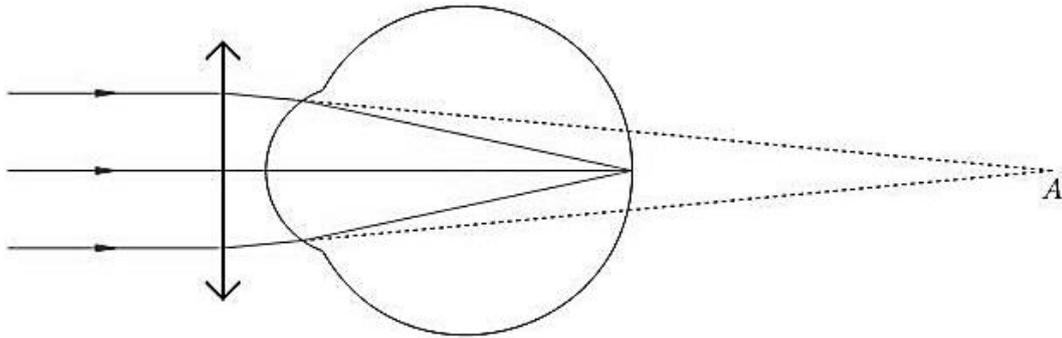


Рис. 15. Коррекция дальновзоркости с помощью очков

### Вопросы и задачи

1. Человек лежит на дне озера на глубине 1 м и смотрит вверх. Он видит светлый круг. Объясните происхождение этого круга и определите его возможный радиус  $R$ . Показатель преломления воды 1,33.

2. Чем объяснить, что человек, который находится в воде, плохо видит предметы?

3. Какой человек будет лучше видеть предметы под водой — близорукий или дальновзоркий?

4. Во сколько раз изображение предмета на сетчатке глаза меньше самого предмета, который находится на расстоянии 30 м от наблюдателя? Фокусное расстояние оптической системы глаза равно 1,5 см.

5. На каком расстоянии близорукий человек может читать без очков мелкий шрифт, если обычно он пользуется очками с оптической силой «−4 Дптр»?

*Примечание:* фокусное расстояние линзы очков определяют по формуле:  $F = \frac{d \cdot d_0}{d - d_0}$ , где  $d$  — расстояние наилучшего зрения для не-

вооруженного глаза;  $d_0 = 25$  см — расстояние наилучшего зрения для нормального глаза.

# ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ИХ ПРИРОДА И ДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНИЗМ

## РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Рентгеновское излучение (рентгеновские лучи) — электромагнитное (фотонное) излучение с длиной волны от 80 до  $10^{-5}$  нм. Тормозное рентгеновское излучение образуется при уменьшении кинетической энергии (торможении, рассеянии) быстрых заряженных частиц. **Рентгеновская трубка** — электровакуумный прибор, предназначенный для генерации рентгеновского излучения. Излучающий элемент представляет собой вакуумный сосуд с двумя основными электродами: катодом К и анодом А (рис. 16).

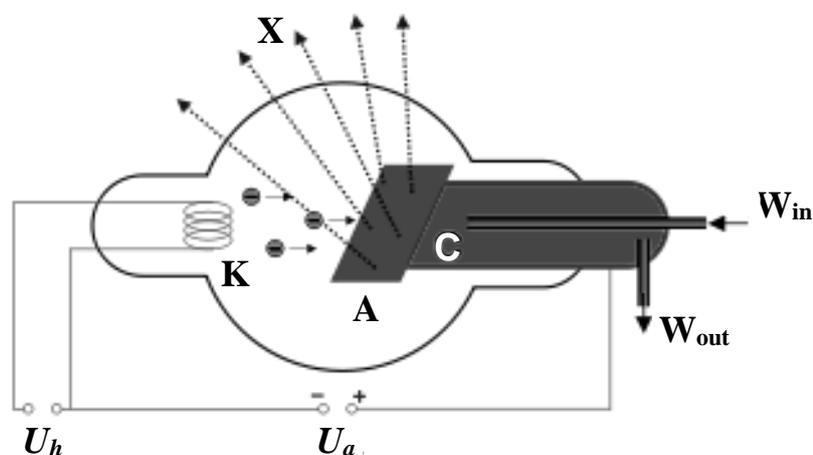


Рис. 16. Схема рентгеновской трубки:

X — рентгеновские лучи; С — теплоотвод;  $U_h$  — напряжение накала катода;  $U_a$  — ускоряющее напряжение;  $W_{in}$  — впуск водяного охлаждения;  $W_{out}$  — выпуск водяного охлаждения

Между катодом и анодом создается высокое постоянное напряжение, которое сообщает электронам большую кинетическую энергию и заставляет электроны двигаться на анод. При попадании на анод электроны испытывают резкое торможение, их кинетическая энергия частично переходит в энергию рентгеновского излучения, а оставшаяся часть — в тепло, нагревающее анод.

Одно из наиболее важных медицинских применений рентгеновского излучения — просвечивание внутренних органов с диагностической целью (рентгенодиагностика). К основным методам относятся рентгеноскопия, рентгенография и флюорография.

*Рентгеноскопия* — изображения рассматривают на флюоресцирующем экране. Данное исследование еще называют просвечиванием.

В основном применяется для исследования грудной полости и брюшной полости. Рентгеноскопия позволяет провести обследование в динамике, другими словами, помогает оценить состояние органов в процессе функционирования.

*Рентгенография* — изображение фиксируется на пленке или на специальных цифровых устройствах (статичное изображение органа). Изображение на рентгенограмме позволяет оценить форму, положение и размеры анатомических органов, а также оценить их структуру.

*Флюорография* — методика рентгенологического исследования, при которой производят фотографирование изображения с флюоресцирующего экрана на пленку. Основным назначением флюорографии является массовое (профилактическое) обследование населения для выявления скрыто протекающих заболеваний легких — профилактическая флюорография. Основными преимуществами флюорографии перед рентгенографией является экономия дорогостоящей рентгеновской пленки и быстрота выполнения, т. е. большая пропускная способность. На выполнение одной флюорограммы тратится в 3 раза меньше времени, чем на выполнение одной рентгенограммы. Недостаток — меньшая разрешающая способность и, соответственно, меньшая информативность.

Интересным и перспективным вариантом рентгенографии является метод, называемый *рентгеновской томографией*. Такой вариант томографии позволяет получать послойные изображения тела на экране электронно-лучевой трубки или на бумаге с деталями менее 2 мм при различии поглощения рентгеновского излучения менее 0,1 %. Это позволяет, например, различать серое и белое вещество мозга и видеть очень маленькие опухолевые образования.

С лечебной целью рентгеновское излучение (рентгенотерапию) применяют **в различных областях медицины: онкологии, дерматологии и косметологии, травматологии и ортопедии**. Рентгенотерапия может вызывать различные эффекты. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения, ритма облучения, объекта воздействия, характера и стадии заболевания и, наконец, реактивности организма больного могут иметь место противовоспалительные, десенсибилизирующие, деструктивные, анальгезирующие и другие эффекты. Рентгенотерапия применяется преимущественно при сравнительно неглубоком расположении патологического очага и при возможности применения небольших доз облучения, так как в ткани интенсивность такого рентгеновского излучения резко убывает.

## РАДИОАКТИВНОСТЬ. АЛЬФА- И БЕТА- ЧАСТИЦЫ. ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ. БИОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Радиоактивность появилась на Земле с момента ее образования, и человек на протяжении всей истории развития своей цивилизации находился под воздействием естественных источников излучения. Наша планета подвергается воздействию радиационного фона, источниками которого являются излучение Солнца, космическое излучение, излучение радиоактивных элементов, залегающих в недрах земли.

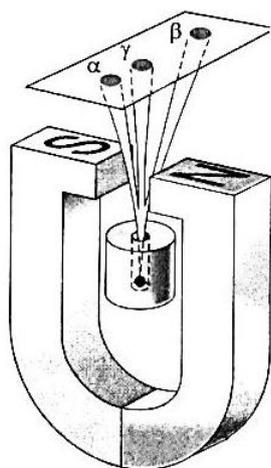


Рис. 17. Схема экспериментальной установки

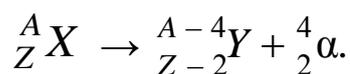
Атомы вещества состоят из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Ядра многих атомов способны к самопроизвольным превращениям, в результате которых возникают ядра других атомов и ионизирующие излучения в виде квантов электромагнитной энергии и элементарных частиц. Различие в свойствах этих частиц было обнаружено в опытах, основа которых схематически показана на рис. 17.

Радиоактивный препарат помещали на дно узкого канала в свинцовом цилиндре. Против канала находилась фотопластинка. На выходящее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны лучу. Вся установка размещалась в вакууме. Когда магнитное поле отсутствовало, на фотопластинке получалось одно темное пятно точно напротив канала. В магнитном же поле появлялись и другие темные пятна в стороне от направления оси цилиндра. Ту часть радиоактивного излучения, которая не отклоняется магнитным полем (электромагнитные волны длиной  $10^{-11}$ – $10^{-13}$  м) назвали  $\gamma$ -лучами. Две другие составляющие, которые отклонялись в противоположные стороны, получили название альфа-лучей (поток ядер гелия) и бета-лучей (поток электронов).

**Виды радиоактивного распада.** Для каждого распадающегося ядра существуют только свои строго определенные виды частиц, которые возникают при его распаде. В зависимости от природы возникающих частиц выделяют несколько видов распада.

**Альфа-распад.** В этом виде распада ядро испускает альфа-частицу. Обозначим ядро элемента  ${}^A_Z X$ , где  $Z$  — число протонов,

$A$  — массовое число. На основании законов сохранения заряда и массового числа запишем схему превращений распадающегося ядра:

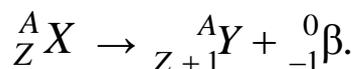


Таким образом, при альфа-распаде из ядра элемента  $X$  образуется ядро нового элемента  $Y$ . У этого нового ядра число протонов на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у исходного ядра. Кроме того, при альфа-распаде может возникать и гамма-излучение.

Примером альфа-распада может служить превращение радия  ${}^{226}_{88} \text{Ra}$  в радон  ${}^{222}_{86} \text{Rn}$ :  ${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \alpha.$

*Бета-распад.* Этот распад может происходить с испусканием либо *электрона*, либо *позитрона*. Масса и величина заряда у позитрона такие же, как у электрона, только знак заряда положителен. Электрон обозначен символом  ${}^0_{-1} \beta$ , а позитрон —  ${}^0_{+1} \beta$ . Верхний индекс обозначает массовое число. Для электрона и позитрона масса крайне мала по сравнению с массой нуклона, поэтому массовое число для них принято считать равным нулю.

Схема превращения распадающегося ядра  $X$  при *электронном*  $\beta$ -распаде может быть представлена следующим образом:



В этом случае образуется ядро атома нового элемента  $Y$ , у которого заряд ядра на одну элементарную единицу заряда больше, чем у распадающегося ядра  $X$ .

При *позитронном*  $\beta$ -распаде из закона сохранения заряда следует следующая схема превращений:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} \beta.$

Образуется новое ядро, у которого заряд на одну электронную единицу меньше, чем у распадающегося ядра.

Оказывается, что при всех видах бета-распада возникают еще и другие частицы. Они не имеют заряда и имеют крайне малую (практически не измеряемую) массу. Они получили название *нейтрино* и *антинейтрино*. Обнаружить эти частицы крайне сложно из-за их огромной проникающей способности. Кроме того, во многих случаях бета-распада возникает и гамма-излучение.

Пример электронного бета-распада — превращение радиоактивного стронция  ${}^{90}_{38} \text{Sr}$  в иттрий  ${}^{90}_{39} \text{Y}$ :  ${}^{90}_{38} \text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39} \text{Y} + {}^0_{-1} \beta.$

Пример позитронного бета-распада — превращение радиоактивного фосфора  ${}_{15}^{30}\text{P}$  в кремний  ${}_{14}^{30}\text{Si}$ :



В процессе радиоактивного излучения ядра атомов могут испускать гамма-кванты. Испускание гамма-квантов не сопровождается распадом ядра атома. Гамма излучение зачастую сопровождает явления альфа- или бета-распада. При альфа- и бета-распаде новое возникшее ядро первоначально находится в возбужденном состоянии и когда оно переходит в нормальное состояние, то испускает гамма-кванты (в оптическом или рентгеновском диапазоне волн).

**Биофизические основы действия ионизирующего излучения.** Альфа-, бета- и гамма-излучения очень сильно различаются по проникающей способности, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей проникающей способностью обладают  $\alpha$ -лучи — они полностью поглощаются листом тонкой бумаги или внешним омертвевшим слоем кожи. Однако если вещество, испускающее альфа-частицы, попадает внутрь организма с пищей или воздухом, оно облучает внутренние органы и становится опасным из-за высокой ионизирующей способности (количества ионов, которое создает частица на своем пути).

Бета-частицы отличаются меньшей ионизирующей способностью. Попадая на незащищенные участки тела, бета-излучение оказывает воздействие, как правило, на верхние слои кожи (глубина проникновения в мягкие ткани организма 10–15 мм).

Наибольшей проникающей способностью обладают  $\gamma$ -лучи. Гамма-излучение — это фотоны, т. е. электромагнитная волна, несущая энергию. В воздухе оно может проходить большие расстояния, постепенно теряя энергию в результате столкновений с атомами среды. Интенсивное гамма-излучение, если от него не защититься, может повредить не только кожу, но и внутренние ткани. При прохождении  $\gamma$ -лучей через такой слой свинца их интенсивность ослабевает лишь вдвое.

### **Вопросы и задачи**

1. Как возникает тормозное рентгеновское излучение?
2. В чем основное отличие рентгеноскопии от рентгенографии?
3. Почему при воздействии на организм человека различных видов излучения при одинаковых физических дозах более сильное биологическое воздействие оказывает  $\alpha$ -излучение («альфа»-излучение).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Детлаф, А. А.* Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. 4-е изд., испр. Москва : Высшая школа, 2002. 718 с.,
2. *Матвеев, Л. П.* Теория и методика физической культуры (общие основы теории и методики физического воспитания; теоретико-методические аспекты спорта и профессионально-прикладных форм физической культуры): учеб. для ин-тов физ. культуры / Л. П. Матвеев. Москва : Физкультура и спорт, 1991. 543 с.
3. *Селуянов, В. Н.* Контроль и физическая подготовка горнолыжников: метод. пособие / В. Н. Селуянов, В. А. Рыбаков, М. П. Шестаков [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://mipt.ru/education/chair/sport/science/skiing>.
4. *Лещенко, В. Г.* Медицинская и биологическая физика : учеб. пособие / В. Г. Лещенко, Г. К. Ильич. Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2017. 552 с.
5. *Практикум по медицинской и биологической физике : учеб. пособие / В. Г. Лещенко [и др.].* Минск : БГМУ, 2018. 220 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Элементы биомеханики .....	4
Механические свойства биологических тканей.....	4
Физика мышечного сокращения.....	6
Вес, перегрузки, невесомость .....	8
Рычаги в опорно-двигательном аппарате человека.....	11
Механические колебания и волны, их воздействие на организм.....	13
Вибрации и резонансы человека.....	13
Звук и ультразвук в медицине .....	14
Гидростатика и гидродинамика в медицинской физике .....	17
Основные законы гидростатики применительно к решению медицинских задач .....	17
Движение жидкости по цилиндрическим трубам.....	18
Механика сердечного выброса. Пульсовая волна, ее скорость.....	22
Биофизика внешнего дыхания .....	26
Переход газа из одного состояния в другое. Изопроецессы. Легочное дыхание .....	26
Электрические явления в организме. Воздействие электрических токов и полей на организм .....	29
Емкостные свойства клеточных мембран. Природа биопотенциалов .....	29
Действие постоянного тока на человека.....	36
Действие переменного тока (НЧ, ЗЧ, УЗЧ) на человека.....	37
Воздействие электромагнитных волн радиодиапазона на организм человека .....	39
Оптика глаза.....	41
Строение глазного яблока. Глаз как собирающая линза.....	41
Близорукость и дальнозоркость. Исправление дефектов зрения с помощью очков.....	43
Ионизирующие излучения, их природа и действие на организм.....	46
Рентгеновское излучение .....	46
Радиоактивность. Альфа- и бета- частицы. Гамма-излучение. Биофизические основы действия ионизирующего излучения .....	48
Список использованной литературы.....	51