

№ МПД-19

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-ОСЕТИНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ»
Министерства здравоохранения Российской Федерации

КАФЕДРА ХИМИИ И ФИЗИКИ

РУКОВОДСТВО

К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ФИЗИКА, МАТЕМАТИКА»

(ЧАСТЬ I)



ВЛАДИКАВКАЗ – 2021

Составители:

канд. пед. наук, доцент *Боциева Н.И.*,
канд. физ.-мат. наук, доцент *Боциев И.Ф.*

Рецензенты:

зав. кафедрой физики конденсированного состояния
ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет
им. К.Л. Хетагурова»
д.ф.-м.н., проф. *Магкоев Т.Т.*

зав. кафедрой биохимии ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России
к.м.н., доцент *Гурина А.Е.*

Пособие разработано в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 32.05.01 Медико-профилактическое дело и содержит учебно-методические материалы к лабораторным занятиям по дисциплине «Физика, математика».

Для студентов медико-профилактического факультета

СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПРОИЗВОДНАЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛ ФУНКЦИИ.....	6
НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ	14
ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ.	20
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ.....	29
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕМЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ. ФОРМУЛЫ БЕРНУЛЛИ И ПУАССОНА.....	34
ДИСКРЕТНЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ.....	41
НЕПРЕРЫВНЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ. НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.....	46
СТАТИСТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБОРКИ. ПОЛИГОН И ГИСТОГРАММА.....	52
ТОЧЕЧНЫЕ И ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАЛЬНОЙ СОВОКУПНОСТИ.....	59
МАНОМЕТРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАСОСНОЙ ФУНКЦИИ СЕРДЦА, ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	65
АУДИОМЕТРИЯ.....	75
ДОПЛЕРОМЕТРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА КРОВИ	83

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в организме человека, часто близки к физическим. Например, такой сложный физиологический процесс, как кровообращение, в основе своей является физическим и связан с несколькими ее разделами: гидродинамикой, т.к. представляет собой течение жидкости, колебаниями и волнами, т.к. при прохождении крови по кровеносной системе происходит распространение упругих (механических) колебаний по сосудам, механикой (работа сердца), электричеством (генерация биопотенциалов). Дыхание связано с движением газа (аэродинамика), испарением (фазовые превращения), теплоотдачей (термодинамика) и т.д.

В организме (как и в неживой природе) имеют место молекулярные процессы. Именно они в итоге определяют поведение биологических систем. Поэтому, понимание физики таких микропроцессов очень важно для правильной оценки состояния организма, природы ряда заболеваний, действия лекарственных препаратов и т.д. Во всех этих аспектах физика тесно связана с биологией и формирует самостоятельную науку – биофизику.

В теоретическом плане предметом изучения современной биофизики являются физические и физико-химические процессы, лежащие в основе биологических процессов на всех уровнях организации живой материи: молекулярном, субклеточном, клеточном, органно-тканевом и на уровне организма в целом.

Заметим, что многие методы диагностики и исследования основаны на использовании физических принципов и идей. Большинство современных медицинских по назначению аппаратов конструктивно являются физическими приборами. В этой связи следует отметить значение физики для медицины как теоретической основы медицинской техники. Достижения физики и техники вооружают медицину новыми приборами и аппаратами, и тем самым, не только обеспечивают возможность совершенствования существующих или введения новых методов диагностики и лечения, но и влияют на развитие различных областей самой медицины. Так, трудно переоценить значение для любой области медицины открытия рентгеновских лучей. Медицинские приборы, основанные на волоконной оптике, позволяют осматривать внутренние полости организма. Широкое распространение получил диагностический метод, основанный на записи биопотенциалов, возникающих в живом организме. Спектральный анализ используется в судебной медицине, фармакологии и биологии, гигиене.

Достижения ядерной физики позволили снабдить медицину принципиально новыми методами диагностики заболеваний и их лечения. Например, метод меченых атомов позволяет изучить процесс обмена веществ без нарушения нормальной жизнедеятельности организма. В медицине широко используются различные радиоактивные изотопы. Так, изотоп йода вводят в организм, затем с помощью специальных датчиков бета- и гамма-излучения регистрируют места его скопления, чтобы зафиксировать (локализовать) ту или иную патологию (например, в щитовидной железе). Радиоактивные изотопы используют также для разрушения опухолей и злокачественных образований. В клинической практике все большее значение приобретают малотравматичные способы диагностики внутренних органов. Эти исследования наиболее результативны при использовании различных методик радиоизотопной диагностики.

Для современной физиологии и медицины характерно все более широкое использование математического аппарата. В связи с использованием точных методов исследования и рассмотрением процессов жизнедеятельности вплоть до молекулярного уровня медицина не может обойтись без аппарата высшей математики, который дает возможность описания явлений в динамике. Так, многие процессы в организме могут быть

описаны точно только с помощью дифференциальных уравнений. И.П. Павлов, рассматривая жизнь как ряд постепенно усложняющихся «уравновешиваний» организма с внешней средой и характеризуя значение математического описания этих процессов, писал: «Придет время,, когда математический анализ, опираясь на естественнонаучный, охватит величественными формулами уравнений эти уравновешивания...» (Павлов И.П. Собр. соч. т.3, кн.1, с.124).

В практической деятельности врач постоянно имеет дело с количественными показателями (температура тела больного, артериальное давление крови, дозировка лекарственного препарата и т.п.). Важно знать, как получены эти величины, какова их точность. Математической базой этих вопросов являются теория вероятностей и математическая статистика.

Нормальное функционирование живого организма возможно только при взаимодействии с окружающей средой. Он остро реагирует на изменение таких физических характеристик среды как температура, влажность, давление воздуха. Действие внешней среды на организм может использоваться для лечения (климатотерапия, баротерапия). Отсюда следует, что врач должен уметь оценивать физические свойства и характеристики окружающей среды.

В общем комплексе различных методов лечения в медицине имеют место и физические факторы. Электрическое и электромагнитное воздействия широко используются в физиотерапии (индуктотермия, УВЧ-терапия, МВ-терапия и др.). С лечебной целью применяют ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, рентгеновское и гамма-излучения.

Комплекс разделов прикладной физики и биофизики, в которых рассматриваются физические законы, явления, процессы и их характеристики для решения медицинских задач составляет *медицинскую физику*.

Мы привели только некоторые примеры, но в действительности нет такой области медицины, в которой не применялись бы физические методы диагностики и лечения и не использовались бы физические приборы и аппараты.

ПРОИЗВОДНАЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛ ФУНКЦИИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Понятия производной и дифференциала являются одними из основных понятий математического анализа. Вычисление производных необходимо при решении многих задач в физике и математике (нахождение скорости, ускорения, давления и т. д.). Важность понятия производной, в частности, определяется тем, что производная функции характеризует скорость изменения этой функции при изменении ее аргумента.

Применение дифференциала позволяет осуществить приближенные вычисления, а также проводить оценку погрешностей.

2. Теория:

1. Задачи, приводящие к понятию производной

1. *Задача о нахождении скорости v материальной точки.* Пусть материальная точка движется по прямолинейной траектории, которую примем за ось Ox (рис. 1).

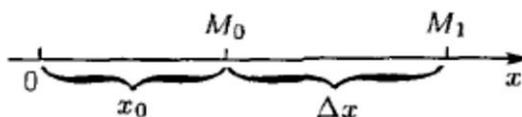


Рис. 1. Движение точки вдоль прямолинейной траектории.

Положение точки на траектории будет тогда определяться ее абсциссой x , которая является функцией времени t : $x = f(t)$.

Пусть в момент времени t_0 движущаяся точка занимала на траектории положение M_0 и имела абсциссу x_0 , а через промежуток времени Δt переместилась в положение M_1 и имеет абсциссу $x_0 + \Delta x$. Таким образом, если за время Δt точка не меняла направление движения, то $|\Delta x|$ — путь, пройденный точкой за время Δt .

Очевидно, что $\Delta x = f(t_0 + \Delta t) - f(t_0)$. Назовем средней скоростью движения точки за время Δt отношение $\Delta x / \Delta t$.

Мгновенной скоростью движения точки в момент времени t_0 назовем предел v , к которому стремится средняя скорость точки за промежуток времени Δt , когда $\Delta t \rightarrow 0$:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t_0 + \Delta t) - f(t_0)}{\Delta t}, \quad (1)$$

Таким образом, для нахождения мгновенной скорости материальной точки необходимо вычислить предел отношения приращения функции Δx к приращению аргумента Δt при условии, что $\Delta t \rightarrow 0$.

2. *Задача о нахождении угла наклона касательной к графику функции.* Рассмотрим график некоторой функции $y = f(x)$ (рис.2). В точке M_0 к графику функции проведем касательную, образующую с положительным направлением оси Ox угол φ_0 . Найдем φ_0 . Для этого на графике выберем произвольную точку M и проведем секущую MM_0 . Она наклонена к оси Ox под углом φ . Рассмотрим ΔM_0MP :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{MP}{M_0P} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}, \quad (2)$$

Если точку M_0 фиксировать, а точку M приближать к M_0 , то секущая MM_0 будет переходить в касательную к графику функции в точке M_0 и можно записать:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (3)$$

Таким образом, необходимо вычислить предел отношения приращения функции к приращению аргумента, если приращение аргумента стремится к нулю.

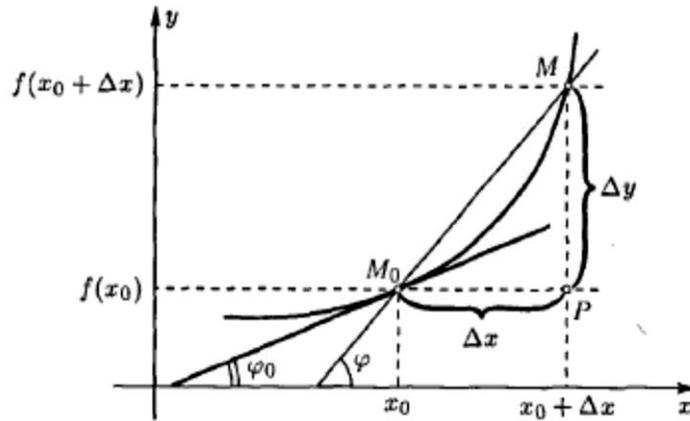


Рис. 2.

Предел отношения приращения Δy функции $y = f(x)$ к приращению аргумента Δx в заданной точке x_0 при стремлении Δx к нулю и при условии, что этот предел существует, называется производной функции в точке x_0 .

Обозначения производной: y' , $f'(x)$, $\frac{dy}{dx}$. По определению

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (4)$$

Нахождение производной данной функции называется ее *дифференцированием*. Дифференцирование основных элементарных функций производится по готовым формулам (см. табл.1), а также с помощью *правил*:

1. Производная алгебраической суммы функций равна сумме производных этих функций:

$$(u+v)' = u' + v'$$

2. Производная произведения двух функций равна сумме произведений второй функции на производную первой и первой функции на производную второй:

$$(u \cdot v)' = u'v + u v'$$

3. Производная частного двух функций равна дроби, числитель которой есть разность между произведениями знаменателя на производную числителя и числителя на производную знаменателя, а знаменатель - квадрат знаменателя:

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}.$$

Таблица 1. Производные основных элементарных функций

1. $(C)' = 0$, где $C = const.$
2. $(x)' = 1.$
3. $(x^n)' = nx^{n-1}.$
4. $(a^x)' = a^x \ln a$, при $a > 0$ и $a \neq 1.$
4а. $(e^x)' = e^x.$
5. $(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$, при $a > 0$ и $a \neq 1.$
5а. $(\ln x)' = \frac{1}{x}.$
6. $(\sin x)' = \cos x.$
7. $(\cos x)' = -\sin x.$
8. $(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}.$
9. $(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}.$
10. $(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$
11. $(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$
12. $(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}.$
13. $(\operatorname{arccotg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}.$

Физический смысл производной. Из сравнения (4) и (1) следует, что *мгновенная скорость прямолинейного движения материальной точки равна производной зависимости ее координаты от времени.*

Общий смысл производной функции заключается в том, что она характеризует *скорость (быстроту) изменения функции при данном изменении аргумента.* Быстрота протекания физических, химических и других процессов, например скорость охлаждения тела, скорость химической реакции, скорость размножения бактерий и т.п., также выражается при помощи производной.

Геометрический смысл производной. Величину тангенса угла наклона касательной, проведенной к графику функции, в математике называют *угловым коэффициентом касательной.*

Угловым коэффициентом касательной, проведенной к графику дифференцируемой функции в некоторой точке, численно равен производной функции в данной точке.

Это утверждение называют *геометрическим смыслом производной*.

2. Производная сложной функции

Из элементарных функций образуются *сложные* функции. Допустим, задана функция $y=f(u)$, где u в свою очередь зависит от x , т.е. $u=\varphi(x)$. Тогда, при изменении x будут меняться u и y . В этом случае заданная функция $y=f(u)$ называется *сложной* и обозначается $y=f[\varphi(x)]$. Величина u называется *промежуточной* переменной.

Тогда производная y'_x (по x) равна произведению производной y'_u (по u) на производную u'_x (по x):

$$y'_x = y'_u \cdot u'_x, \quad (5)$$

Пример 1. Найти производную функции $y=e^{kx}$.

Решение. Обозначим $u=kx$, тогда $y=e^u$. Находим производную $y'_u=e^u$. Подставим значение $u=kx$, тогда $y'_u=e^{kx}$. Находим $u'_x=k$.

Ответ. $y' = y'_u \cdot u'_x = k e^{kx}$

3. Производные высших порядков

Если производная $y'=\varphi(x)$ от функции $y=f(x)$ дифференцируема, то от нее, в свою очередь, можно вычислить производную, которая называется *производной второго порядка* или *второй производной* от заданной функции по аргументу x . Ее обозначение y'' ,

$\frac{d^2 y}{dx^2}$, $\frac{d^2 f(x)}{dx^2}$. Возможно образование производных и более высоких порядков: y''' , (или

$\frac{d^3 y}{dx^3}$) и т.д.

Производная второго порядка от заданной функции $y=f(x)$ вычисляется путем последовательного двукратного дифференцирования заданной функции по общим правилам:

$$y=f(x); y'=f'(x)=\varphi(x); y''=f''(x)=\varphi'(x).$$

Пример 2. $y=x^4, y'=4x^3, y''=12x^2$.

Физический смысл производной второго порядка – это *мгновенное (в заданный момент времени) значение ускорения при прямолинейном неравномерном движении тела*.

Действительно, скорость $v = \frac{dS}{dt}$, а ускорение есть изменение скорости, т.е.

$$a = v' = S'' \text{ или } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 S}{dt^2}.$$

Пример 3. Задано уравнение движения тела $S=2t^2$ (м). Найти скорость и ускорение через 5 с после начала движения.

Решение. Скорость $v = \frac{dS}{dt} = 4t = 20 \text{ м/с}$. Ускорение $a = \frac{d^2 S}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = 4 \text{ м/с}^2$.

4. Дифференциал функции

Из уравнения (4) можно записать равенство

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = y' + \beta, \quad (6)$$

где β - некоторая бесконечная малая величина. При $\Delta x \rightarrow 0$ $\frac{\Delta y}{\Delta x} \rightarrow y'$, т.е. β тоже стремится к нулю. Преобразовав (6) имеем:

$$\Delta y = y' \Delta x + \beta \Delta x, \quad (7)$$

Из (7) видно, что приращение функции состоит из двух слагаемых. Слагаемое $y' \Delta x$ называют *главной частью приращения функции* $y = f(x)$ или *дифференциалом функции*.

Дифференциал функции равен произведению производной функции на приращение аргумента и символически обозначается dy :

$$dy = y' \Delta x, \quad (8)$$

Таким образом, *дифференциал функции, в общем случае отличаясь от приращения функции, представляет собой главную часть этого приращения, линейную относительно приращения аргумента*. В этом заключается *аналитический смысл дифференциала*.

Отсюда следует, что при достаточно малых приращениях аргумента величина приращения функции приближенно равна дифференциалу этой функции:

$$\Delta y \approx dy, \quad (9)$$

Для выяснения геометрического смысла дифференциала рассмотрим график функции $y = f(x)$, изображенный на рис.3. В точке A проведем касательную. Рассмотрим $\triangle DAC$. Катет AC равен приращению аргумента Δx ; $\operatorname{tg} \varphi = y'$; $DC = \operatorname{tg} \varphi AC = y' \Delta x$. Итак, $DC = dy$.

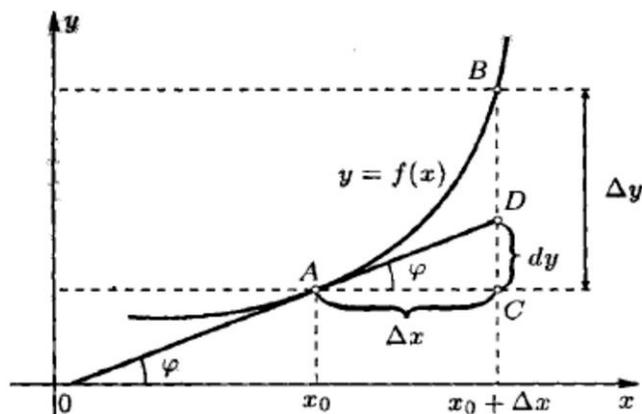


Рис. 3. Геометрический смысл дифференциала.

Таким образом, *дифференциал функции является приращением ординаты касательной (DC), которое соответствует приращению Δx (AC) абсциссы*. В этом заключается *геометрический смысл дифференциала*.

Дифференциалом аргумента называют приращение аргумента, т.е.

$$dx = \Delta x, \quad (10)$$

С учетом (10) можно записать:

$$dy = y' dx, \quad (11)$$

5. Применение дифференциала функции в приближенных вычислениях

Применение дифференциала функции в приближенных вычислениях основано на использовании формулы (9), которая справедлива при достаточно малых приращениях аргумента функции $y = f(x)$. Если в этой формуле приращение Δy представить в виде $\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$, а дифференциал в виде $dy = f'(x) \cdot \Delta x$, то будем иметь:

$$f(x + \Delta x) - f(x) \approx f'(x) \cdot \Delta x,$$

откуда

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + f'(x) \Delta x, \quad (12)$$

Формулу (12) можно использовать при нахождении приближенных значений функций.

Пример 4. Найти приближенно значение функции

$$f(x) = \sqrt{x}$$

для значения ее аргумента, равного 16,02.

Решение. Найдем производную данной функции:

$$f'(x) = (\sqrt{x})' = \frac{1}{2\sqrt{x}}$$

и подставим в формулу (12):

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + \frac{1}{2\sqrt{x}} \cdot \Delta x.$$

Положим $x = 16$, а $\Delta x = 0,02$. Тогда

$$f(16,02) = f(16 + 0,02) \approx f(16) + \frac{1}{2\sqrt{16}} \cdot 0,02 \approx \sqrt{16} + 0,0025 \approx 4,0025.$$

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Определение производной функции.
2. Физический и геометрический смыслы производной.
3. Таблицу производных основных элементарных функций.
4. Правила дифференцирования.
5. Определение дифференциала функции.
6. Понятие дифференциала аргумента.
7. Правила для вычисления дифференциалов функций.

8. Формулу для вычисления приближенных значений функций с помощью дифференциала.

Студент должен уметь:

1. Вычислять производные и дифференциалы функций.
2. Применять дифференциал функции в приближенных вычислениях.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Задачи, приводящие к понятию производной функции:
 - а) задача о нахождении мгновенной скорости прямолинейного неравномерного движения материальной точки;
 - б) задача о касательной к кривой.
2. Производная функции. Геометрический и физический смыслы производной.
3. Нахождение производной функции. Таблица производных основных элементарных функций.
4. Основные правила дифференцирования.
5. Производная сложной функции.
6. Производные высших порядков.
7. Связь между дифференциалом функции и приращением функции.
8. Геометрический и аналитический смыслы дифференциала.
9. Применение дифференциала функции в приближенных вычислениях.

Практическая часть:

1. Найдите производные и дифференциалы функций:

- | | |
|--|--|
| 1) $y = \frac{2}{\sqrt{x}} + \frac{\sqrt{x}}{2}$; | 7) $y = \sqrt[3]{x^2} + \frac{1}{x} + 2$; |
| 2) $y = \frac{x^3}{\sin^3 3x}$; | 8) $y = \arccos x$; |
| 3) $y = e^{3x+1}$; | 9) $y = \sqrt{\sin 2x}$; |
| 4) $\ln \sin x + x^5$; | 10) $y = e^{\cos x} \sin x$; |
| 5) $y = (1 + 2x + 3x^2 + 4x^3)^5$; | 11) $y = \frac{e^{2x}}{\cos 2x}$. |
| 6) $y = e^2 + \cos 2x$; | 12) $y = \sin x \cos x$; |

2. Определите ускорение точки в указанные моменты времени, если скорость точки, движущейся прямолинейно, задается уравнениями:

$$\text{а) } V = t^2 + 2t, \quad t = 3 \text{ с}; \quad \text{б) } V = 4 \sin \frac{t}{2}, \quad t = \frac{\pi}{3}.$$

3. Вычислите приращение функции, соответствующее изменению аргумента от x_1 до x_2 :

$$1) y = 2x^3 - 4x; \quad x_1 = 1; \quad x_2 = 1,02;$$

$$2) y = 3x^2 - 2x; \quad x_1 = 2; \quad x_2 = 2,001;$$

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение производной функции.
2. Сформулируйте основные правила дифференцирования.
3. Запишите формулу производной сложной функции.
4. В чем состоят физический и геометрический смыслы производной функции?
5. Что называется дифференциалом функции?
6. В чем заключается геометрический смысл дифференциала функции?
7. Что называется дифференциалом аргумента?
8. Как выражается производная функции через дифференциал?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. В чем состоит физический смысл производной второго порядка?
2. Как связаны мгновенное ускорение материальной точки и зависимость ее координаты от времени?
3. В чем заключается аналитический смысл дифференциала?
4. На чем основано применение дифференциала функции для приближенных вычислений?
5. Как используется дифференциал для вычисления погрешностей?
6. Как находятся дифференциалы второго; высшего порядков?

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §§ 2.1-2.7, 2.10-2.16.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§2.1, 2.2.

НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Способы нахождения производных и дифференциалов функций и их применение составляют основную задачу дифференциального исчисления. Необходимость понятия производной возникает в связи с постановкой задачи о вычислении скорости движения и нахождении угла касательной к кривой. Возможна и обратная задача: по скорости определить пройденный путь, а по тангенсу угла наклона касательной найти соответствующую функцию. Такая обратная задача приводит к понятию неопределенного интеграла.

2. Теория:

1. Понятие неопределенного интеграла

Функция $F(x)$ называется *первообразной функции* $f(x)$ на интервале (a,b) , если она дифференцируема на этом интервале и в каждой его точке

$$F'(x) = f(x), \quad (1)$$

Например, первообразными функции $4x^3$ являются функции x^4 и x^4+6 , так как

$$(x^4)' = 4x^3 \quad \text{и} \quad (x^4+6)' = 4x^3.$$

Заметим, что вообще, если $F(x)$ первообразная $f(x)$, то $F(x)+C$, где C - произвольная постоянная, также является первообразной $f(x)$, так как

$$(F(x)+C)' = F'(x) = f(x), \quad (2)$$

Совокупность всех первообразных функции $f(x)$ называется *неопределенным интегралом от функции* $f(x)$. Он обозначается символом

$$\int f(x)dx$$

Функция $f(x)$ называется *подынтегральной функцией*, $f(x)dx$ - *подынтегральным выражением*.

Если $F(x)$ - какая-нибудь первообразная функции $f(x)$, то

$$\int f(x)dx = F(x) + C, \quad (3)$$

где C - произвольная постоянная. Нахождение неопределенного интеграла называется *интегрированием функции* $f(x)$. Чтобы найти интеграл, надо выполнить действия, обратные дифференцированию.

Основные свойства неопределенного интеграла

$$1. \left[\int f(x) dx \right]' = f(x)$$

$$2. d \int f(x) dx = f(x) dx$$

$$3. \int F'(x) dx = F(x) + C;$$

$$4. \int dF(x) = F(x) + C;$$

$$5. \int [f(x) \pm g(x)] dx = \int f(x) dx \pm \int g(x) dx;$$

$$6. \int kf(x) dx = k \int f(x) dx;$$

где k - постоянный множитель, отличный от нуля.

Таблица основных интегралов

$$1. \int dx = x + C;$$

$$2. \int x^\alpha dx = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C, \quad \alpha \neq -1$$

$$3. \int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C;$$

$$4. \int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C; \quad (a > 0, \quad a \neq 1)$$

$$5. \int e^x dx = e^x + C;$$

$$6. \int \sin x dx = -\cos x + C;$$

$$7. \int \cos x dx = \sin x + C;$$

$$8. \int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C;$$

$$9. \int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C;$$

$$10. \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C = -\arccos x + C;$$

$$11. \int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg}x + C = -\operatorname{arcc}tgx + C ;$$

2. Методы интегрирования

На практике при вычислении неопределенных интегралов их стараются свести к табличному виду различными методами. Рассмотрим некоторые из них.

Метод разложения (непосредственного интегрирования)

Этот метод заключается в разложении подынтегральной функции с использованием свойств неопределенного интеграла в линейную комбинацию основных табличных интегралов.

$$\text{Пример 1. } \int (e^x + 4x^3) dx = \int e^x dx + \int 4x^3 dx = e^x + 4 \frac{x^4}{4} + C = e^x + x^4 + C.$$

Метод замены переменной

Пример 2. Пусть требуется найти интеграл $\int \cos(ax+b) dx$, где $a \neq 0$.

Введем переменную $t=ax+b$; Тогда $dt=adx$, откуда $dx = \frac{dt}{a}$, Таким образом

$$\int \cos(ax+b) dx = \int \cos t \frac{dt}{a} = \frac{1}{a} \sin t + C$$

Возвращаясь к переменной x , окончательно имеем

$$\int \cos(ax+b) dx = \frac{1}{a} \sin(ax+b) + C .$$

Пример 3. Найти $\int x e^{x^2} dx$. Положим $t=x^2$; Тогда $dt=2x dx$, откуда $x dx = \frac{dt}{2}$; таким образом

$$\int x e^{x^2} dx = \frac{1}{2} \int e^t dt = \frac{e^t}{2} + C = \frac{1}{2} e^{x^2} + C .$$

Метод интегрирования по частям

Пусть $u(x)$ и $v(x)$ - непрерывно дифференцируемые функции на некотором промежутке. Тогда дифференциал их произведения равен

$$d(uv) = u dv + v du, \tag{4}$$

Проинтегрируем (4) по x . Имеем

$$uv = \int u dv + v du$$

откуда

$$\int u dv = uv - \int v du, \quad (5)$$

Равенство (5) называется *формулой интегрирования по частям*. Она позволяет нахождение одного интеграла свести к нахождению более простого интеграла.

Пример 4. Найти $\int x \arctg x dx$. Положим $u = \arctg x$. Тогда $du = \frac{dx}{1+x^2}$, $v = \frac{x^2}{2}$ и по формуле интегрирования по частям получим

$$\begin{aligned} \int x \arctg x dx &= \frac{x^2}{2} \arctg x - \frac{1}{2} \int \frac{x^2}{1+x^2} dx = \frac{x^2}{2} \arctg x - \frac{1}{2} \int dx + \frac{1}{2} \int \frac{dx}{1+x^2} = \\ &= \frac{x^2}{2} \arctg x - \frac{x}{2} + \frac{1}{2} \arctg x + C = \frac{x^2+1}{2} \arctg x - \frac{x}{2} + C \end{aligned}$$

Пример 5. Найти $\int x \ln x dx$; Положим $u = \ln x$, $dv = x dx$.

Тогда $du = \frac{dx}{x}$, $v = \frac{x^2}{2}$ и по формуле интегрирования по частям будем иметь

$$\int x \ln x dx = \frac{x^2}{2} \ln x - \int \frac{x^2}{2} \frac{1}{x} dx = \frac{x^2}{2} \ln x - \frac{x^2}{4} + C.$$

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Определение первообразной функции.
2. Определение неопределенного интеграла.
3. Понятия подынтегральной функции, подынтегрального выражения, произвольной постоянной интегрирования, переменной интегрирования.
4. Таблицу основных интегралов.
5. Основные свойства неопределенного интеграла.
6. Основные методы интегрирования.

Студент должен уметь:

Вычислять неопределенные интегралы с помощью:

- 1) метода разложения (метода непосредственного интегрирования);
- 2) метода замены переменной интегрирования (метода подстановки);
- 3) метода интегрирования по частям.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Первообразная функции.
2. Неопределенный интеграл.
3. Основные свойства неопределенного интеграла.

4. Основные табличные интегралы.

5. Основные методы интегрирования:

- a) метод разложения (метод непосредственного интегрирования);
- b) метод замены переменной интегрирования (метод подстановки);
- c) метод интегрирования по частям.

Практическая часть:

1. Найдите интегралы, используя метод разложения:

1) $\int \frac{1-3x}{x^2} dx;$

4) $\int \frac{(1-x)^2}{x\sqrt{x}} dx;$

2) $\int \left(\frac{1}{\sqrt{x}} + \cos x \right) dx;$

5) $\int \left(3x^2 + \frac{4}{x} \right) dx;$

3) $\int \left(\frac{3}{\sqrt[3]{x}} + e^x \right) dx;$

6) $\int (5 \cos x - x) dx.$

2. Найдите интегралы методом замены переменной:

1) $\int \frac{\cos x}{\sin^4 x} dx;$

4) $\int \sin x \cos^4 x dx;$

2) $\int \frac{\cos x dx}{(1 + \sin x)^2};$

5) $\int \frac{e^x}{e^x + 2} dx;$

3) $\int \frac{2e^x}{(2 + e^x)^2} dx;$

6) $\int \operatorname{ctg} x dx.$

3. Найдите интегралы методом интегрирования по частям:

1) $\int x \cos x dx;$

4) $\int x^2 \ln x dx;$

2) $\int \frac{\ln x}{x^3} dx;$

5) $\int x e^{3x} dx;$

3) $\int e^x \sin x dx;$

6) $\int e^x \cos x dx.$

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение первообразной функции.
2. Приведите основные свойства неопределенного интеграла.
3. В чем состоит метод замены переменной интегрирования?
4. Запишите формулу интегрирования по частям.

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Является ли метод интегрирования по частям универсальным? В каких случаях следует его использовать?
2. Какие две основные задачи, связанные с физическим и геометрическим истолкованием производной, решаются с помощью интегрирования?
3. Как проверить правильность нахождения неопределенного интеграла?

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы –15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §§ 5.1 – 5.4.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 4.1, 4.

ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Понятие определенного интеграла используют в ряде практических задач, в частности в задачах по вычислению площадей плоских фигур, расчету работы, производимой переменной силой, нахождению среднего значения функции.

2. Теория:

Рассмотрим задачи, приводящие к понятию определенного интеграла.

1. Задача о нахождении площади криволинейной трапеции

Пусть дана неотрицательная функция $y=f(x)$, график которой изображен на рис.1.

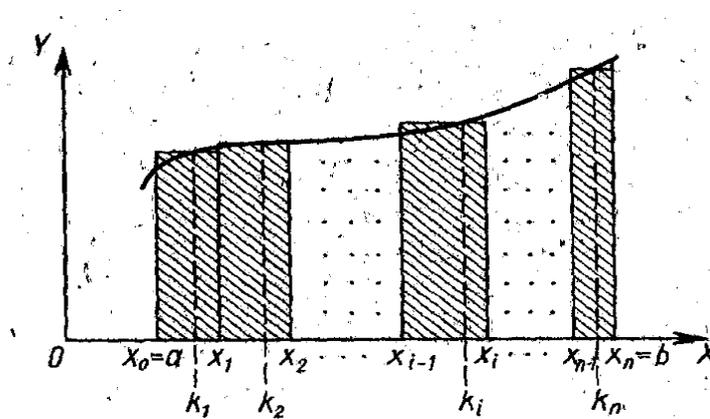


Рис.1

Выберем на оси OX точки a и b и восставим из них перпендикуляры до пересечения с кривой. Фигура, ограниченная кривой, перпендикулярами и осью OX , называется криволинейной трапецией. Вычислим площадь этой трапеции. Для этого разобьем отрезок $[a, b]$ на n частичных отрезков точками

$$x_0 = a < x_1 < x_2 < \dots < x_{i-1} < x_i < \dots < x_n = b.$$

Внутри каждого отрезка $[x_{i-1}, x_i]$ длины $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ выберем произвольную точку k_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Составим произведения $f(k_1)\Delta x_1, f(k_2)\Delta x_2, \dots$

Каждое такое произведение равно площади прямоугольника с основанием $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots$ и высотой, равной значению функции $f(x)$ в произвольной точке соответствующего отрезка. Сумма таких произведений

$$\sum_{i=1}^n f(k_i) \Delta x_i, \quad (1)$$

называется *интегральной суммой* для функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$ и равна площади всех прямоугольников.

Если каждый из отрезков достаточно мал, т.е. $\Delta x_1 \rightarrow 0$, $\Delta x_2 \rightarrow 0$ и т.д., то площадь заштрихованной области (рис.1) стремится к площади криволинейной трапеции, равной:

$$S = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(k_i) \Delta x_i \quad (2)$$

Таким образом, задача о вычислении площади криволинейной трапеции сводится к определению предела интегральной суммы (1).

2. Задача о вычислении работы переменной силы

Пусть материальная точка единичной массы перемещается из точки a в точку b оси OX под воздействием переменной силы, направленной вдоль оси OX (т.е., сила является функцией x : $y=f(x)$). Требуется найти работу A этой силы.

Разобьем отрезок $[a, b]$ произвольно на n частей точками (рис.2)

$$x_0 = a < x_1 < x_2 < \dots < x_{i-1} < x_i < \dots < x_n = b.$$

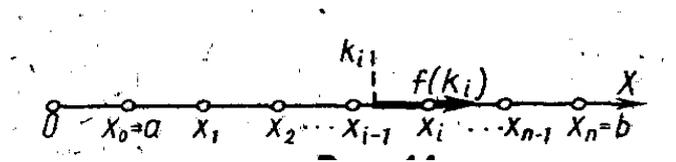


Рис.2

При достаточно мелком разбиении можно считать, что на каждом отрезке $[x_{i-1}, x_i]$ величина силы $f(x)$ почти постоянна и приближенно равна ее значению в некоторой точке k_i ; $f(x) \approx f(k_i)$ для любых точек $x \in [x_{i-1}, x_i]$.

Работа ΔA_i силы на каждом отрезке $[x_{i-1}, x_i]$ тогда будет приближенно равна $f(k_i) \Delta x_i$, где $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$, а работа силы по перемещению массы вдоль всего отрезка $[a, b]$ будет приближенно равна

$$A \approx \sum_{i=1}^n f(k_i) \Delta x_i, \quad (3)$$

Значение работы A будет тем точнее, чем мельче будет разбиение. Поэтому для получения точного значения работы переменной силы на всем отрезке $[a, b]$ необходимо перейти к пределу при $\Delta x_i \rightarrow 0$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

$$A = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(k_i) \Delta x_i \quad (4)$$

Таким образом, и для вычисления работы переменной силы необходимо уметь определять предел интегральной суммы (1).

Функция $f(x)$ на отрезке $[a, b]$ называется *интегрируемой*, если существует такое число I , к которому стремится интегральная сумма (1) при $\Delta x_i \rightarrow 0$. Тогда число I называется *определенным интегралом* функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$ и обозначается

$$I = \int_a^b f(x) dx ;$$

$[a, b]$ - область интегрирования, a называется нижним пределом интегрирования, b - верхним пределом интегрирования. Из сказанного следует, что

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(k_i) \Delta x_i , \quad (5)$$

Таким образом, вычисление площади криволинейной трапеции и работы переменной силы связано с нахождением определенного интеграла.

3. Основные свойства определенного интеграла

1. *Определенный интеграл с равными пределами равен нулю:*

$$\int_a^a f(x) dx = 0.$$

2. *При перемене местами пределов интегрирования величина определенного интеграла изменяется на противоположную:*

$$\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx.$$

3. *Если отрезок интегрирования $[a, b]$ разделен на конечное число n частичных отрезков $[a, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, b]$, то определенный интеграл от функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$ равен сумме определенных интегралов от этой функции на каждом из частичных отрезков (свойство аддитивности):*

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^{x_1} f(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^b f(x) dx .$$

4.
$$\int_a^b kf(x) dx = k \int_a^b f(x) dx ,$$

где k - постоянный множитель.

5. *Определенный интеграл от алгебраической суммы конечного числа функций, интегрируемых на отрезке $[a, b]$, равен алгебраической сумме определенных интегралов этих функций на данном отрезке:*

$$\int_a^b [f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)] dx = \int_a^b f_1(x) dx + \int_a^b f_2(x) dx + \dots + \int_a^b f_n(x) dx.$$

Величина определенного интеграла от функции $f(x)$, непрерывной на отрезке $[a, b]$, равна приращению любой из первообразных для этой функции на данном отрезке:

$$\int_a^b f(x) dx = F(x) \Big|_a^b = F(b) - F(a), \quad (6)$$

Формула (6) называется *формулой Ньютона-Лейбница*.

Из этой формулы следует, что для вычисления определенного интеграла достаточно найти какую-либо из первообразных для подынтегральной функции и из ее значения, соответствующего верхнему пределу интегрирования, вычесть значение, соответствующее нижнему пределу.

Пример 1. Вычислить определенный интеграл $\int_0^1 x^4 dx$.

Решение. Первообразной для функции x^4 (имеющей наиболее простой вид), является $\frac{x^5}{5}$.

Поэтому в соответствии с формулой Ньютона-Лейбница имеем

$$\int_0^1 x^4 dx = \frac{x^5}{5} \Big|_0^1 = \frac{1^5}{5} - \frac{0^5}{5} = \frac{1}{5}.$$

4. Основные методы вычисления определенных интегралов

4.1. Метод разложения (непосредственного интегрирования)

Этот метод основан на использовании свойств определенного интеграла, знании формул простейших неопределенных интегралов и применении формулы Ньютона-Лейбница.

Пример 2. Вычислить определенный интеграл $I = \int_0^{\frac{\pi}{3}} (x + 2 \cos x) dx$.

Решение. Воспользуемся свойствами (3) и (4) определенных интегралов:

$$I = \int_0^{\frac{\pi}{3}} x dx + 2 \int_0^{\frac{\pi}{3}} \cos x dx.$$

Первообразные для подынтегральных функций найдем с помощью формул простейших определенных интегралов. Далее, используя формулу Ньютона-Лейбница, получим

$$I = \frac{x^2}{2} \Big|_0^{\frac{\pi}{3}} + 2 \sin x \Big|_0^{\frac{\pi}{3}} = \frac{\left(\frac{\pi}{3}\right)^2}{2} - \frac{0^2}{2} + 2 \left(\sin \frac{\pi}{3} - \sin 0 \right) = \frac{\pi^2}{18} + 2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - 0 \right) = \frac{\pi^2}{18} + \sqrt{3}.$$

4.2. Метод замены переменной (метод подстановки)

Этот метод основан на замене переменной интегрирования в определенном интеграле с целью свести его вычисление к вычислению такого определенного интеграла, который может быть вычислен методом разложения.

Пример 3. Вычислить интеграл $I = \int_1^3 e^{2x} dx$.

Решение. Введем новую переменную $t = 2x$; Тогда $dt = 2dx$, откуда $dx = \frac{dt}{2}$.

При замене переменной интегрирования в определенном интеграле необходимо одновременно заменить пределы интегрирования на соответствующие. Имеем: при $x = 1$ $t = 2$, при $x = 3$ $t = 6$. Отсюда следует, что новым нижним пределом интегрирования будет значение 2, а новым верхним – значение 6. Таким образом

$$I = \int_1^3 e^{2x} dx = \int_2^6 e^t \frac{dt}{2} = \frac{1}{2} \int_2^6 e^t dt = \frac{1}{2} e^t \Big|_2^6 = \frac{1}{2} (e^6 - e^2) = \frac{1}{2} e^2 (e^4 - 1).$$

Замечание. Если при замене переменной в неопределенном интеграле мы от новой переменной t возвращались к первоначальной переменной x , то при замене переменной в определенном интеграле в этом нет необходимости.

4.3. Метод интегрирования по частям

Этот метод основан на использовании следующей формулы интегрирования по частям:

$$\int_a^b u dv = uv \Big|_a^b - \int_a^b v du, \quad (7)$$

где $u = u(x)$ и $v = v(x)$ – непрерывно дифференцируемые функции на отрезке $[a, b]$.

Пример 4. Вычислить определенный интеграл $I = \int_0^{\pi} x \cos x dx$.

Решение. Данный интеграл не может быть вычислен непосредственно ни методом разложения, ни методом замены переменной. Положим $u = x$, $dv = \cos x dx$. Найдем отсюда $du = dx$, $v = \sin x$. Тогда

$$I = \int_0^{\pi} x \cos x dx = x \sin x \Big|_0^{\pi} - \int_0^{\pi} \sin x dx = \pi \sin \pi - 0 \sin 0 + \cos x \Big|_0^{\pi} = \cos \pi - \cos 0 = -1 - 1 = -2$$

5. Некоторые приложения определенного интеграла

5.1. Вычисление площадей плоских фигур

Применение определенного интеграла для вычисления площадей плоских фигур основано на геометрическом смысле определенного интеграла: *площадь S криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции $y=f(x)$, осью абсцисс и прямыми линиями $x=a$ и $x=b$, численно равна определенному интегралу от этой функции на отрезке $[a,b]$:*

$$S = \int_a^b f(x)dx.$$

Если плоская фигура ограничена прямыми $x=a$, $x=b$ ($a < b$) и кривыми $y=f_1(x)$, $y=f_2(x)$, причем $f_1(x) < f_2(x)$ ($a < x < b$), то ее площадь вычисляется по формуле:

$$S = \int_a^b [f_2(x) - f_1(x)]dx, \quad (8)$$

В частном случае, когда плоская фигура ограничена снизу осью OX , формула (8) упрощается:

$$S = \int_a^b f_2(x)dx, \quad (9)$$

Пример 5. Вычислить площадь фигуры, ограниченной кривыми (рис.3) $y = \sqrt{x}$ и $y = x^2$.

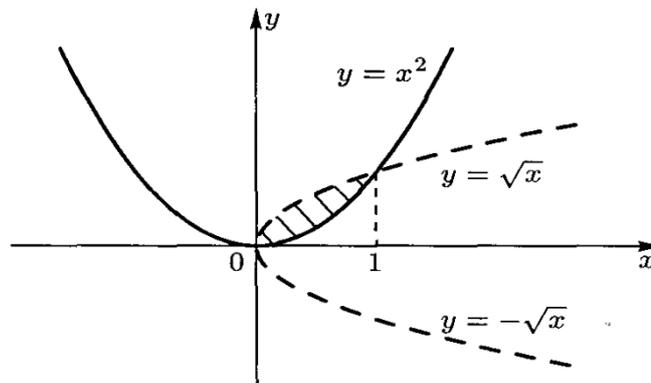


Рис.3

Решение. Найдем точки пересечения кривых: $\sqrt{x} = x^2$, следовательно $x = x^4$. Отсюда $x_1 = 0$, $x_2 = 1$ и по формуле (8) имеем

$$S = \int_0^1 (\sqrt{x} - x^2)dx = \frac{2}{3}x^{3/2} \Big|_0^1 - \frac{x^3}{3} \Big|_0^1 = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{1}{3}.$$

5.2. Работа переменной силы

Сравнивая формулу (4) с формулой (5) для определенного интеграла, приходим к выводу, что *работа переменной силы $f(x)$, действующей на материальную точку при перемещении ее из точки $x=a$ в точку $x=b$, численно равна определенному интегралу от этой силы на отрезке $[a,b]$* :

$$A = \int_a^b f(x)dx, \quad (10)$$

Пример 6. Найти величину работы, которую необходимо совершить для растяжения пружины от положения равновесия на величину $l=0,1$ м, если коэффициент упругости пружины $k=200$ Н/м.

Решение. В соответствии с законом Гука для растяжения пружины на величину x необходимо приложить силу $f(x) = kx$.

Подставляя это выражение в (10), получим зависимость работы A приложенной силы от растяжения l пружины:

$$A = \int_0^l kx dx = k \frac{x^2}{2} \Big|_0^l = \frac{kl^2}{2}.$$

Подставив в эту формулу численные значения, окончательно получим:

$$A = \frac{200 \cdot 0,1^2}{2} = 1(\text{Дж}).$$

5.3. Нахождение средних значений функций

Средним значением функции $f(x)$ на конечном отрезке $[a,b]$ называется величина \bar{f} , определяемая соотношением:

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx, \quad (11)$$

Пример 7. Найдем среднее значение функции $y = \sin x$ на отрезке $[0, \pi]$.

Решение. В соответствии с формулой (11) имеем:

$$\bar{f} = \frac{1}{\pi - 0} \int_0^{\pi} \sin x dx = \frac{1}{\pi} (-\cos x) \Big|_0^{\pi} = -\frac{1}{\pi} (\cos \pi - \cos 0) = \frac{2}{\pi}.$$

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Задачи, приводящие к понятию определенного интеграла:
2. Понятие интегральной суммы.
3. Формулу Ньютона- Лейбница.
4. Основные свойства определенного интеграла.
5. Основные методы вычисления определенных интегралов:

Студент должен уметь:

1. Вычислять определенные интегралы различными методами: методом разложения; методом замены переменной интегрирования; методом интегрирования по частям.
2. Вычислять средние значения функций, площади плоских фигур, работу переменной силы.

4. Содержание обучения:**Теоретическая часть:**

1. Задачи, приводящие к понятию определенного интеграла:
 - a) о вычислении площади криволинейной трапеции;
 - b) о вычислении работы переменной силы.
2. Формула Ньютона - Лейбница.
3. Основные свойства определенного интеграла.
4. Основные методы вычисления определенных интегралов;
5. Некоторые приложения определенного интеграла:
 - a) вычисление площадей плоских фигур;
 - b) вычисление средних значений функций;
 - c) вычисление работы переменной силы.

Практическая часть:

1. Вычислите определенные интегралы методом разложения:

$$1) \int_1^8 \left(\frac{3}{\sqrt[3]{x}} + e^x \right) dx;$$

$$3) \int_1^2 \left(3x^2 + \frac{2}{x} \right) dx;$$

$$2) \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2 \sin x + 3 \cos x) dx;$$

$$4) \int_1^5 \frac{(x+2)^2}{3x} dx.$$

2. Вычислите определенные интегралы методом замены переменной:

$$1) \int_0^9 \sqrt{5-2x} dx;$$

$$3) \int_0^{\frac{\pi}{3}} \operatorname{tg} x dx;$$

$$2) \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos x}{\sin^4 x} dx;$$

$$4) \int_0^1 \frac{e^x}{e^x + 4} dx.$$

3. Вычислите определенные интегралы методом интегрирования по частям:

$$1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} x \sin x dx;$$

$$3) \int_1^e \frac{\ln x}{x^2} dx;$$

2) $\int_0^1 \arctg x dx$;

4) $\int_1^e x \ln x dx$.

4. Вычислите площади фигур, ограниченных линиями:

1. $y=x^2$ и $y=x^3$.

2. $y = \sqrt{x}$ и $y=x$.

5. Найдите среднее значение функций:

1. $y=\cos x$ на отрезке $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$.

2. $y = \sqrt{x}$ на отрезке $[0,4]$.

6. Вычислите работу переменной силы :

1. $f(x) = 4x^5 + 3x^2 + 2x$ при перемещении материальной точки вдоль оси абсцисс из положения с абсциссой $x_1 = 1$ в положение с абсциссой $x_2 = 4$.

2. $f(x) = e^{2x}$ при прямолинейном перемещении материальной точки из положения с абсциссой $x_1 = 0$ в положение с абсциссой $x_2 = 2$.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте геометрическую интерпретацию определенного интеграла.
2. Что называется интегральной суммой?
3. Запишите формулу Ньютона-Лейбница.
4. Приведите основные свойства определенного интеграла.
5. Запишите формулу для вычисления средних значений функций.

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Можно ли результат вычисления определенного интеграла проверить дифференцированием?
2. На чем основано применение определенного интеграла для вычисления площадей плоских фигур?
3. Опишите методы интегрирования заменой переменной и по частям.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §§ 6.1 – 6.7.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 5.1-5.6.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

1. Научно-методическое обоснование темы:

При математическом описании различных физических, химических, биологических процессов и явлений часто используют уравнения, содержащие не только изучаемые величины, но и их производные различных порядков от этих величин. Например, в соответствии с простейшей версией закона размножения бактерий, скорость размножения пропорциональна количеству бактерий в данный момент времени. Если это количество обозначить через $N(t)$, то в соответствии с физическим смыслом производной скорость размножения бактерий представляет собой производную $N'(t)$, и на основании упомянутого закона можно записать соотношение $N'(t)=k \cdot N$, где $k>0$ - коэффициент пропорциональности. Полученное уравнение не является алгебраическим, так как содержит не только неизвестную функцию $N(t)$, но и ее производную первого порядка.

1. Теория:

1. Понятие дифференциального уравнения

Уравнение, содержащее независимую переменную x , искомую функцию $y=f(x)$, а также ее производные y' , y'' , и т.д. называется *обыкновенным дифференциальным уравнением*. Общий вид дифференциального уравнения:

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0, \quad (1)$$

Порядком дифференциального уравнения называется порядок наивысшей производной, входящей в это уравнение.

Например, $y'+xy-5=0$ – уравнение первого порядка, $y''+6y'+x=0$ – уравнение второго порядка.

Общий вид уравнения первого порядка:

$$F(x, y, y') = 0, \quad (2)$$

Общим решением дифференциального уравнения называется функция, удовлетворяющая двум условиям: во-первых, эта функция должна удовлетворять данному дифференциальному уравнению, т.е. при подстановке в уравнение должна обращать его в тождество; во-вторых, количество *произвольных постоянных* в этой функции должно быть равным *порядку* данного уравнения.

Общее решение дифференциального уравнения n -го порядка имеет вид:

$$y = f(x, C_1, C_2, \dots, C_n), \quad (3)$$

а общее решение дифференциального уравнения I порядка

$$y = f(x, C), \quad (4)$$

Из общего решения путем вычисления постоянных интегрирования, исходя из заданных дополнительных условий, можно найти *частные решения* данного уравнения.

Дифференциальными уравнениями описывают различные процессы в физике, химии, биологии, фармации.

Из уравнений первого порядка рассмотрим уравнения с *разделяющимися переменными*.

2. Уравнения с разделяющимися переменными

Уравнение с разделяющимися переменными имеет вид $y' = \varphi(x, y)$, причем его правая часть может быть представлена в виде произведения двух отдельных функций: $\varphi(x, y) = \varphi_1(x) \cdot \varphi_2(y)$. Тогда

$$y' = \frac{dy}{dx} = \varphi_1(x) \cdot \varphi_2(y).$$

Преобразуем это уравнение, разделив переменные справа и слева:

$$\frac{dy}{\varphi_2(y)} = \varphi_1(x) dx.$$

Общий вид уравнения с разделенными переменными

$$f(y)dy = \varphi(x)dx.$$

Уравнение решается непосредственным интегрированием: слева по переменной y и справа по переменной x с прибавлением постоянной интегрирования C :

$$\int f(y)dy = \int \varphi(x)dx \text{ или } F(y) = \Phi(x) + C.$$

Решая это уравнение, находим:

$$y = \psi(x) + C.$$

Таким образом, алгоритм решения дифференциального уравнения с разделяющимися переменными следующий:

- а) если уравнение содержит производную, то представить ее в виде $\frac{dy}{dx}$;
- б) преобразовать уравнение, перенося все члены его, содержащие y в левую часть, содержащие x – в правую;
- в) проинтегрировать по общим правилам левую часть по аргументу y и правую – по аргументу x с прибавлением постоянной интегрирования C .
- г) решая полученное уравнение, найти искомую функцию.

Пример: Найти общее решение уравнения $y' = 2xy$ и частное решение, соответствующее условию

$$y = 2 \text{ при } x = 0, \quad (5)$$

Решение. Представим производную y' в виде отношения дифференциалов:

$$\frac{dy}{dx} = 2xy.$$

Разделим переменные:

$$\frac{dy}{y} = 2x dx;$$

Проинтегрируем полученное уравнение:

$$\int \frac{dy}{y} = 2 \int x dx$$

$$\ln y = x^2 + C.$$

Так как в уравнение входит $\ln y$, то постоянную удобнее выразить в виде логарифма:

$$\ln y = x^2 + \ln C$$

$$\ln y - \ln C = x^2$$

$$\ln \frac{y}{C} = x^2$$

Потенцируя это равенство, получим:

$$e^{\ln \frac{y}{C}} = e^{x^2}$$

Отсюда $\frac{y}{C} = e^{x^2}$, и для общего решения имеем

$$y = Ce^{x^2}, \quad (6)$$

Для нахождения частного решения подставим начальное условие (5) в (6):
 $2 = Ce^0 = C$, т.е. $C=2$ и искомое частное решение будет иметь вид

$$y = 2e^{x^2}, \quad (7)$$

2. Задачи на составление дифференциальных уравнений

1. *Задача о скорости размножения бактерий.* Скорость размножения бактерий пропорциональна их количеству. В начальный момент имелось 100 бактерий, в течение трех часов их число удвоилось. Найти зависимость количества бактерий от времени.

Решение. Пусть N – количество бактерий в момент времени t . Тогда согласно условию

$$\frac{dN}{dt} = kN, \quad (8)$$

где k - коэффициент пропорциональности. Уравнение (8) представляет собой уравнение разделяющимися переменными и его решение имеет вид:

$$N = Ce^{kt}, \quad (9)$$

Из начального условия известно, что $N(0) = 100$. Следовательно,

$$C = 100 \quad \text{и} \quad N = 100e^{kt}.$$

Из дополнительного условия $N(3) = 200$. Тогда

$$200 = 100e^{kt}, \quad 2 = e^{3k}, \quad e^k = 2^{1/3}.$$

Таким образом, для искомой функции получаем:

$$N = 100 \cdot 2^{t/3}. \quad (10)$$

2. *Задача об увеличении количества фермента.* В культуре пивных дрожжей быстрота прироста действующего фермента пропорциональна его начальному количеству x . Первоначальное количество фермента a в течение часа удвоилось. Найти зависимость $x(t)$.

Решение. По условию задачи дифференциальное уравнение процесса имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = kx, \quad (11)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Общее решение уравнения (11) (уравнение с разделяющимися переменными) имеет вид:

$$x = Ce^{kt}, \quad (12)$$

Постоянную C найдем из начального условия $x(0) = a$:

$$a = Ce^0 = C.$$

Тогда

$$x(t) = ae^{kt}, \quad (13)$$

Известно также, что $x(1) = 2a$. Значит $2a = ae^k$, отсюда $e^k = 2$ и окончательно имеем

$$x(t) = a2^t. \quad (14)$$

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Определение обыкновенного дифференциального уравнения.
2. Понятие общего и частного решений дифференциального уравнения.
3. Определение дифференциального уравнения с разделяющимися переменными и алгоритм его решения.

Студент должен уметь:

Находить решения дифференциальных уравнений первого порядка с разделяющимися переменными.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Понятие дифференциального уравнения.
2. Порядок дифференциального уравнения.
3. Общее и частное решения дифференциального уравнения.

4. Дифференциальные уравнения первого порядка с разделяющимися переменными.
 5. Задачи на составление дифференциальных уравнений.

Практическая часть:

1. Решите дифференциальные уравнения первого порядка с разделяющимися переменными:

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| 1) $y' = 2x^2 + 1;$ | 7) $y'(x+1) = 1;$ |
| 2) $y' = 5y;$ | 8) $e^y y' = 1;$ |
| 3) $3x dx = 2y dy;$ | 9) $e^x y' = 1;$ |
| 4) $x^2 dy - \frac{1}{2} y^2 dx = 0;$ | 10) $y' = 2x^2 + 1;$ |
| 5) $(1+y) dy = (1-x) dx;$ | 11) $xy y' = 0,5;$ |
| 6) $(y+1) dx = 2x dy;$ | 12) $4x - 3y^2 y' = 0.$ |

2. Решите дифференциальные уравнения и найдите их частные решения, соответствующие заданным дополнительным условиям:

- 1) $y' = \sqrt{x}$ при условии: $y(0) = 5;$
 2) $y' - \sin x = 0$ при условии: $y\left(\frac{\pi}{3}\right) = 2;$

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение обыкновенного дифференциального уравнения.
2. Что называется порядком дифференциального уравнения?
3. Чем отличаются частное и общее решения дифференциального уравнения?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Содержат ли частные решения дифференциального уравнения произвольные постоянные?
2. Приведите последовательность решения дифференциального уравнения первого порядка с разделяющимися переменными.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §§ 7.1, 7.2.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 6.1, 6.2.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕМЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ. ФОРМУЛЫ БЕРНУЛЛИ И ПУАССОНА

1. Научно-методическое обоснование темы:

Теория вероятностей изучает закономерности, проявляющиеся при изучении таких экспериментов, конкретный результат которых до их проведения невозможно с определенностью предсказать. Так, при однократном подбрасывании монеты нельзя заранее определить, выпадет герб или цифра. В то же время результаты многочисленных экспериментов показывают, что герб и цифра выпадают примерно в одинаковом количестве.

Таким образом, несмотря на случайный характер результата каждого эксперимента, существуют некоторые закономерности для результатов множества аналогичных экспериментов.

2. Теория:

1. Вероятность случайного события

Теория вероятностей - это раздел математики, изучающий закономерности, присущие случайным событиям массового характера.

Случайным называется событие, наступление которого нельзя достоверно предвидеть. В одних и тех же доступных наблюдению условиях оно может произойти, может и не произойти.

Совокупность условий, при которых наступает или не наступает данное случайное событие, называется *испытанием*.

Случайные события принято обозначать большими буквами латинского алфавита: A, B, C, D и т.д.

Относительной частотой случайного события в данной серии испытаний или просто частотой случайного события *A* называют отношение

$$P^*(A) = \frac{m}{n}, \quad (1)$$

где *n*- число независимых испытаний, в которых случайное событие *A* происходит *m* раз.

Вероятностью случайного события назовем предел, к которому стремится частота события при неограниченном увеличении числа испытаний

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n}, \quad (2)$$

Это статистическое определение вероятности.

Если при испытаниях нет каких-либо причин, вследствие которых одно случайное событие появлялось бы чаще других (*равновозможные события*), то можно определить вероятность исходя из теоретических соображений:

Вероятностью случайного события можно назвать отношение благоприятствующих случаев к общему числу равновозможных несовместных событий:

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (3)$$

Это классическое определение вероятности.

2. Виды случайных событий

1) Событие, которое при данном испытании произойдет обязательно, называется *достоверным*, его вероятность равна 1.

Например, достоверным является событие, состоящее в извлечении наугад упаковки аспирина из ящика, в котором находятся только упаковки аспирина.

2) Событие, которое при данном испытании не может произойти, называется *невозможным*, его вероятность равна нулю.

Например, невозможным является событие, состоящее в извлечении наугад упаковки аспирина из ящика, в котором находятся только упаковки анальгина.

3) События называются *несовместными*, если появление любого из них в результате испытания исключает появление других.

Например, если событие A_1 состоит в выпадении цифры 1 при однократном бросании игрального кубика, событие A_2 - в выпадении цифры 2 и т.д., то события A_1, A_2, \dots, A_6 являются несовместными, поскольку осуществление любого из них исключает наступление остальных событий в этом испытании.

4) События называются *совместными*, если появление любого из них в результате испытания не исключает появления остальных.

Например, если событие A_1 состоит в выпадении цифры 1 при однократном бросании игрального кубика, а событие A_2 - в выпадении нечетного числа очков, то эти два события являются совместными, поскольку 1 является нечетным числом.

5) Событие B называется *благоприятствующим* для события A , если при наступлении события B обязательно наступает событие A .

6) События A и B называются *независимыми*, если вероятность наступления каждого из них не зависит от того, наступило ли при этом другое событие.

Например, при одновременном подбрасывании двух монет случайное событие A , состоящее в выпадении герба у одной монеты, и событие B , состоящее в выпадении герба у другой монеты, являются независимыми событиями.

7) Событие B называется *зависимым* от события A , если вероятность наступления события B зависит от того, произошло ли событие A .

Вероятность наступления события B , вычисленная при условии наступления события A , называется *условной вероятностью события B* и обозначается $P(B/A)$.

8) Если два события единственно возможны и несовместны, то их называют *противоположными* и обозначают A и \bar{A} :

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1.$$

9) Система событий A_1, A_2, \dots, A_n называется *полной*, если в результате испытания обязательно наступает только одно из этих событий. Сумма вероятностей событий, образующих полную систему, равна единице:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1.$$

3. Основные теоремы вероятностей

Теорема сложения вероятностей. Вероятность наступления случайного события A или несовместного с ним события B равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A \text{ или } B) = P(A) + P(B), \quad (4)$$

Пример 1. В коробке находятся 2 упаковки аспирина, 3 – аналгина и 5 – цитромона. Наугад извлекается одна упаковка, Какова вероятность того, что ею окажется упаковка аспирина или аналгина?

Решение. Вероятность извлечения упаковки аспирина (вероятность события A) в соответствии с формулой классической вероятности равна:

$$P(A) = \frac{2}{10} = 0,2.$$

Аналогично, вероятность извлечения упаковки аналгина (вероятность события B) равна:

$$P(B) = \frac{3}{10} = 0,3.$$

Так как данные события являются несовместными (если извлечена упаковка аспирина, то при этом упаковка аналгина не извлечена, и наоборот), то для нахождения искомой вероятности в соответствии с теоремой сложения следует сложить найденные вероятности:

$$P(A \text{ или } B) = P(A) + P(B) = 0,2 + 0,3 = 0,5.$$

Теорема умножения вероятностей для независимых событий. Вероятность наступления двух независимых случайных событий A и B равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(A \text{ и } B) = P(A) \cdot P(B), \quad (5)$$

Пользуясь этой теоремой, легко определить, например, вероятность выпадения гербов на двух подбрасываемых монетах. Поскольку событие A , состоящее в выпадении герба у первой монеты, и событие B , состоящее в выпадении герба у второй монеты, являются независимыми и вероятности каждого из них равны 0,5, то по формуле (5) получим:

$$P(A \text{ и } B) = P(A) \cdot P(B) = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25.$$

Теорема умножения вероятностей для зависимых событий. Вероятность наступления случайного события A и зависящего от него события B равна произведению вероятности события A на условную вероятность события B :

$$P(A \text{ и } B) = P(A) \cdot P(B/A), \quad (6)$$

Пример 2. В коробке находятся 2 упаковки аспирина и 3 упаковки аналгина. Наугад извлекают одну упаковку и, не возвращая ее в коробку, извлекают наугад еще одну упаковку. Найти вероятность того, что обе извлеченные упаковки окажутся с аспирином.

Решение. Пусть случайное событие A состоит в том, что первая извлеченная упаковка окажется с аспирином. Вероятность этого события в соответствии с классическим определением вероятности равна:

$$P(A) = \frac{2}{5} = 0,4.$$

Случайное событие B , состоящее в том, что вторая извлеченная упаковка окажется с аспирином, является зависимым от события A , т.к. в случае наступления события A в

коробке останется только одна упаковка с аспирином из четырех и вероятность события B будет равна:

$$P(B/A) = 0,25.$$

Тогда вероятность того, что обе извлеченные упаковки окажутся с аспирином, находится по формуле (6):

$$P(A \text{ и } B) = P(A) \cdot P(B/A) = 0,4 \cdot 0,25 = 0,1.$$

4. Повторные независимые испытания

Повторными независимыми испытаниями называют испытания, удовлетворяющие следующим условиям:

- 1) количество n испытаний конечно;
- 2) вероятность осуществления случайного события A в каждом из испытаний постоянна:

$$P(A) = p = \text{const.}$$

Такая схема испытаний называется *схемой Бернулли*.

Примеры: многочисленные повторные подбрасывания монеты, повторные извлечения наугад одного шара из корзины, содержащей по нескольку шаров различных цветов, при обязательном возвращении каждого шара в корзину после определения его цвета и т.д.

Вероятность того, что в серии из n независимых испытаний, в каждом из которых вероятность наступления случайного события A равна p , это событие произойдет m раз дается *формулой Бернулли*:

$$P_n(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m}, \quad (7)$$

где $q=1-p$ – вероятность ненаступления события в каждом из испытаний.

Пример 3. Принимая вероятность появления на свет девочки при рождении ребенка равной 0,5, найти вероятность того, что в семье с 5 детьми 3 девочки.

Решение. Пусть случайное событие состоит в рождении девочки при появлении на свет каждого из 5 детей в данной семье. Так как вероятность появления девочки при рождении каждого ребенка постоянна ($p=0,5$), то для нахождения искомой вероятности можно воспользоваться формулой Бернулли:

$$P_5(3) = \frac{5!}{3!(5-3)!} 0,5^3 (1-0,5)^{5-3} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2} 0,125 \cdot 0,25 = 0,3125.$$

Если объем n серии независимых повторных испытаний велик, то использование формулы Бернулли сопряжено с вычислительными трудностями. Однако, если n не меньше нескольких десятков, а вероятность наступления случайного события в каждом из испытаний мала ($p \ll 1$), причем $\mu = np$ не превышает 10, то для получения приближенного значения соответствующей вероятности пользуются *формулой Пуассона*:

$$P_n(m) \approx \frac{\mu^m}{m!} e^{-\mu}, \quad (8)$$

(8) также называют «законом редких испытаний».

Эта формула является приближенной, однако получаемые с ее помощью результаты тем ближе к точным, чем больше количество испытаний n .

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Понятие случайного события.
2. Виды случайных событий.
3. Определение вероятности случайного события.
4. Основные свойства вероятности.
5. Теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий.
6. Схему Бернулли.
7. Формулу Бернулли.
8. Формулу Пуассона.

Студент должен уметь:

Находить вероятность события, используя основные теоремы вероятностей, формулы Бернулли и Пуассона.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Случайное событие.
2. Виды случайных событий.
3. Основная характеристика случайного события.
4. Классическое определение вероятности случайного события.
5. Основные свойства вероятности случайного события.
6. Статистическое определение вероятности.
7. Теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий.
8. Независимые повторные испытания (схема Бернулли).
9. Формула Бернулли.
10. Формула Пуассона.

Практическая часть:

1. В некоторую больницу поступают пациенты с четырьмя видами болезней. Многолетние наблюдения показывают, что этим видам заболеваний соответствуют вероятности: 0,1; 0,4; 0,3; 0,2. Для лечения заболеваний с вероятностью 0,1 и 0,2 необходимо переливание крови. Какое количество больных необходимо обеспечить кровью, если в течении месяца поступило 1000 больных?
2. Вероятность заболевания гепатитом для жителей некоторой области в определенный период года составляет 0,0005. Оценить вероятность того, что из обследованных 10000 жителей 4 окажутся заболевшими.
3. Найдите вероятность того, что из четырех облигаций выиграет:
 - только одна,
 - по крайней мере одна.
 Вероятность выигрыша отдельной облигации равно 0,1.
4. В ящике 10 деталей, среди которых 6 окрашенных. Сборщик наудачу извлекает 4 детали. Найти вероятность того, что все детали окажутся окрашенными.

5. Студент знает 20 из 25 вопросов программы. Найти вероятность того, что студент знает предложенные ему экзаменатором три вопроса.
6. Два равносильных соперника играют в шахматы. Что вероятнее: выиграть одну партию из двух или две из четырех?
7. В одном аквариуме находятся 5 белых, 4 красных и 3 голубых рыбки. Двух случайно выбранных рыбок переносят в другой аквариум. Какова вероятность того, что обе рыбки голубые?
8. На клумбе растут 20 красных, 30 синих и 40 белых астр. Какова вероятность сорвать в темноте цветную астру, если срывают одну астру?
9. Два стрелка стреляют по мишени. Вероятность попадания в мишень при одном выстреле для 1-го стрелка равна 0,7, а для 2-го стрелка-0,8. Найти вероятность того, что при одном залпе в мишень попадет только один из стрелков.
10. В цехе работает 7 мужчин и 3 женщины. По табельным номерам наугад отобраны 3 человека. Найти вероятность того, что все отобранные лица окажутся мужчинами.
11. Некто написал 3 письма, запечатал их в конверты, а затем наугад на каждом из них написал различные адреса. Определить вероятность того, что на всех конвертах написаны правильные адреса.
12. Шесть человек больны заболеванием, для которого коэффициент выздоровления составляет 98%. Какова вероятность того, что:
 - а) выздоровеют все шестеро;
 - б) выздоровеют только пятеро?
13. Монету бросают шесть раз. Найти вероятность того, что герб выпадет:
 - а) менее двух раз;
 - б) не менее двух раз.
14. Производится серия из 4 выстрелов по мишеням с вероятностью попадания в каждом выстреле $p=1/4$. Предполагая, что результаты выстрелов – события независимые, найти вероятность того, что будет хотя бы два попадания.
15. В группе из 15 студентов 5 сдали коллоквиум по физике на «отлично» и 6- на «хорошо». Какова вероятность того, что наугад выбранный из этой группы студент сдал коллоквиум на «хорошо» или «отлично».
16. Вероятность осуществления некоторой химической реакции при проведении химического эксперимента определенного вида равна 0,9. Найти вероятность того, что данная реакция произойдет в двух последовательно проведенных экспериментах.
17. Принимая вероятность появления мальчика при рождении ребенка равной 0,5, найти вероятность того, что в семье с 6 детьми:
 - а) мальчиков нет;
 - б) 4 мальчика;
 - в) все дети – мальчики.
18. Монету подбрасывают 8 раз подряд. Какова вероятность того, что герб выпадет 5 раз?
19. Среди семян ржи 0,4 % семян сорняков. Какова вероятность при случайном отборе 5000 семян обнаружить 5 семян сорняков?
20. Завод отправил на базу 5000 доброкачественных изделий. Вероятность того, что в пути изделие повредится, равна 0,0002. Найти вероятность того, что на базу придут три негодных изделия из отправленной партии.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Что называется случайным событием?
2. Приведите определения и примеры различных видов случайных событий (достоверные, невозможные, совместные, несовместные и т.д.).
3. Что является основной характеристикой случайного события?
4. Дайте классическое определение вероятности случайного события.

5. Дайте статистическое определение вероятности случайного события.
6. Что называется схемой Бернулли? Запишите формулу Бернулли.
7. Запишите формулу Пуассона.

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. При каком подходе к определению вероятности случайного события (классическом или статистическом) требуется проведение реальных испытаний? Почему?
2. Сформулируйте теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий.
3. В чем состоит закон «редких испытаний»?

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, § 8.1.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §7.1.

ДИСКРЕТНЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Многие случайные события могут быть количественно оценены случайными величинами, которые принимают значения в зависимости от стечения случайных обстоятельств.

В практической деятельности медицинский работник постоянно имеет дело с такими величинами (число больных на приеме у врача, температура тела больного, артериальное давление крови, дозировка лекарственного препарата и т.п.) Поэтому надо знать, как получены эти величины, какова их точность. Математической базой этих вопросов являются теория вероятностей и математическая статистика.

2. Теория:

Случайной величиной называют такую величину, которая в результате эксперимента принимает какое-либо одно значение из множества ее возможных значений, причем до эксперимента невозможно предсказать, какое именно.

Таковыми величинами являются количество очков при бросании игрального кубика, количество яблок на дереве, температура больного в наугад выбранное время суток, масса наугад выбранной таблетки некоторого препарата и т.д.

Различают *дискретные* и *непрерывные* случайные величины.

1. Дискретные случайные величины

Случайная величина называется *дискретной*, если совокупность всех ее возможных значений представляет собой конечное или бесконечное, но обязательно счетное множество значений, т.е. такое множество, все элементы которого могут быть (по крайней мере, теоретически) пронумерованы и выписаны в соответствующей последовательности.

Такие из перечисленных выше случайных величин, как количество очков, выпадающих при бросании игрального кубика, число посетителей аптеки в течение дня, количество яблок на дереве являются дискретными случайными величинами.

Наиболее полную информацию о дискретной случайной величине дает *закон распределения* этой величины – это соответствие между всеми возможными значениями этой случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Закон распределения дискретной случайной величины часто задают в виде двухстрочной таблицы, в первой строке которой перечислены все возможные значения этой величины (в порядке возрастания), а во второй – соответствующие этим значениям вероятности:

X	x_1	x_2	\dots	x_n
P	p_1	p_2	\dots	p_n

Так как все возможные значения дискретной случайной величины представляют полную систему, то сумма вероятностей равна единице (*условие нормировки*):

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad (1)$$

Закон распределения дискретной случайной величины можно задать также с помощью формулы, позволяющей для каждого возможного значения этой величины определить соответствующую вероятность.

Например, *биномиальный закон распределения* определяет случайную величину X как количество появлений некоторого случайного события A в серии из конечного количества n независимых повторных испытаний, т.е. испытаний, удовлетворяющих схеме Бернулли. При этом вероятность каждого возможного значения величины X ($x_1 = 0; x_2 = 1; x_3 = 2; \dots x_{n+1} = n$) рассчитывают по формуле Бернулли:

$$P_n(X) = \frac{n!}{X!(n-X)!} p^X q^{n-X}, \quad (2)$$

где p — вероятность наступления, а $q = 1 - p$ — вероятность ненаступления события A в каждом из испытаний.

Другим примером является *распределение Пуассона*, используемое для задания случайной величины X , определяемой как количество появлений некоторого редкого случайного события A ($P(A) = p \ll 1$) в серии из большого конечного количества n независимых повторных испытаний, причем произведение $\mu = np < 10$. При этом вероятность каждого из возможных значений величины X ($x_1 = 0; x_2 = 1; x_3 = 2; \dots x_{n+1} = n$) приближенно рассчитывают по формуле Пуассона:

$$P_n(X) \approx \frac{\mu^X}{X!} e^{-\mu}. \quad (3)$$

Для описания определенных особенностей дискретной случайной величины используют ее *основные числовые характеристики*: математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение (стандарт).

Математическим ожиданием $M(X)$ (используется также обозначение « μ ») дискретной случайной величины x называется сумма произведений каждого из всех ее возможных значений на соответствующие вероятности:

$$M(X) = \mu = \sum_{i=1}^n x_i p_i = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n, \quad (4)$$

Основной смысл математического ожидания дискретной случайной величины состоит в том, что оно представляет собой *среднее значение* данной величины. Другими словами, если произведено некоторое количество испытаний, по результатам которых найдено среднее арифметическое всех наблюдавшихся значений дискретной случайной величины X , то это среднее арифметическое приближенно равно (тем точнее, чем больше количество испытаний) математическому ожиданию данной случайной величины. Приведем некоторые свойства математического ожидания.

1. *Математическое ожидание постоянной величины равно этой постоянной величине:*

$$M(C) = C$$

2. *Математическое ожидание произведения постоянного множителя на дискретную случайную величину равно произведению этого постоянного множителя на математическое ожидание данной случайной величины:*

$$M(kX) = kM(X)$$

3. Математическое ожидание суммы двух случайных величин равно сумме математических ожиданий этих величин:

$$M(X+Y)=M(X)+M(Y)$$

4. Математическое ожидание произведения независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий:

$$M(X \cdot Y)=M(X) \cdot M(Y)$$

Отдельные значения дискретной случайной величины группируются около математического ожидания как центра. Для характеристики степени разброса возможных значений дискретной случайной величины относительно ее математического ожидания вводят понятие дисперсии дискретной случайной величины:

Дисперсией $D(X)$ (используется также обозначение « σ^2 ») дискретной случайной величины X называется математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания:

$$D(X)=\sigma^2 =M((X - \mu)^2), \quad (5)$$

На практике дисперсию удобнее вычислить по формуле

$$D(X)=\sigma^2 =M(X^2) - \mu^2, \quad (6)$$

Перечислим основные свойства дисперсии.

1. Дисперсия постоянной величины равна нулю:

$$D(C)=0.$$

2. Дисперсия любой случайной величины есть число неотрицательное:

$$D(X) \geq 0.$$

3. Дисперсия произведения постоянного множителя k на дискретную случайную величину равна произведению квадрата этого постоянного множителя на дисперсию данной случайной величины:

$$D(kX)=k^2 \cdot D(X).$$

В вычислительном отношении более удобна не дисперсия, а другая мера рассеивания случайной величины X , которая чаще всего и используется – среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение или просто стандарт).

Средним квадратическим отклонением дискретной случайной величины называется квадратный корень из ее дисперсии:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}, \quad (7)$$

Удобство стандартного отклонения состоит в том, что оно имеет размерность самой случайной величины X , в то время как дисперсия имеет размерность, представляющую квадрат размерности X .

3. Цель деятельности студентов на занятии:**Студент должен знать:**

1. Определение случайной величины.
2. Понятие дискретной случайной величины.
3. Определение закона распределения дискретной случайной величины.
4. Основные числовые характеристики дискретной случайной величины.

Студент должен уметь:

1. Составлять закон распределения дискретной случайной величины.
2. Находить основные числовые характеристики дискретной случайной величины.

4. Содержание обучения:**Теоретическая часть:**

1. Определение случайной величины.
2. Примеры случайных величин.
3. Понятие дискретной случайной величины.
4. Основные числовые характеристики дискретной случайной величины и их свойства.
5. Биномиальный закон распределения.
6. Распределение Пуассона.

Практическая часть:

1. Число студентов в каждой из 20 групп лечебного факультета составляет соответственно 12, 14, 11, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 10, 13, 14, 15, 16, 10, 15, 13, 14, 12, 15 и 14 человек. Составить закон распределения случайной величины X , определяемой как число студентов в произвольно выбранной группе. Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение этой величины.
2. Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины, заданной следующим законом распределения:

X	2	4	6	7
P	0,1	0,2	0,2	0,5

3. Число фармацевтов в каждой из 20 аптек города составляет 3, 6, 5, 6, 4, 5, 5, 4, 6, 3, 5, 4, 6, 5, 7, 6, 4, 5, 5, и 6 человек. Составить закон распределения случайной величины X , определяемой как число фармацевтов в произвольно выбранной аптеке (из 20 аптек). Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение этой величины.

4. Составить закон распределения случайной величины X , определяемой как число мальчиков в семье с пятью детьми, если вероятность появления мальчика при рождении каждого ребенка принимается равной 0,51.

5. Найти дисперсию дискретной случайной величины X , определяемой как число появлений события A в пяти независимых испытаниях, если вероятность появления события A в каждом испытании равна 0,2.

6. Построить закон распределения числа попаданий мячом в корзину при трех бросках, если вероятность попадания равна 0,4.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение случайной величины.
2. Дайте определение дискретной случайной величины. Приведите примеры.
3. Что называется законом распределения дискретной случайной величины?
4. Запишите формулы основных числовых характеристик дискретных случайных величин.

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Запишите формулу биномиального закона распределения.
2. Запишите формулу распределения Пуассона.
3. Что называется математическим ожиданием, дисперсией и средним квадратическим отклонением дискретной случайной величины?
4. Приведите свойства основных числовых характеристик дискретной случайной величины.
5. В чем состоит удобство среднего квадратического отклонения?

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §8.2.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 7.2.

НЕПРЕРЫВНЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ. НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Многие случайные события могут быть количественно оценены случайными величинами, которые принимают значения в зависимости от стечения случайных обстоятельств.

В практической деятельности медицинский работник постоянно имеет дело с такими величинами (число больных на приеме у врача, температура тела больного, артериальное давление крови, дозировка лекарственного препарата и т.п.) Поэтому надо знать, как получены эти величины, какова их точность. Математической базой этих вопросов являются теория вероятностей и математическая статистика.

2. Теория:

1. Непрерывные случайные величины

Случайная величина называется *непрерывной*, если множество ее возможных значений представляет собой некоторый конечный или бесконечный промежуток числовой оси.

Например, непрерывными случайными величинами являются: температура больного в фиксированное время суток, масса наугад выбранной таблетки некоторого препарата, рост наугад выбранного студента и др.

Непрерывную случайную величину нельзя задать в виде таблицы ее закона распределения, поскольку невозможно перечислить и выписать в определенной последовательности все ее значения, а также потому, что вероятность любого конкретного значения непрерывной случайной величины равна нулю.

Одним из возможных способов задания непрерывной случайной величины является использование с этой целью соответствующей *функции распределения*.

Функция $F(x)$, равная вероятности того, что случайная величина X в результате испытания примет значение, меньшее x , называется *функцией распределения* данной случайной величины:

$$F(x) = P(X < x), \quad (1)$$

Свойства функции распределения

1. *Функция распределения удовлетворяет неравенству:*

$$0 \leq F(x) \leq 1, \quad (2)$$

2. *Функция распределения является неубывающей функцией, т.е. из $x_2 > x_1$ следует $F(x_2) \geq F(x_1)$.*

3. *Функция распределения стремится к 0 при неограниченном убывании ее аргумента и стремится к 1 при его неограниченном возрастании.*

График функции распределения в общем случае имеет вид (рис. 1):

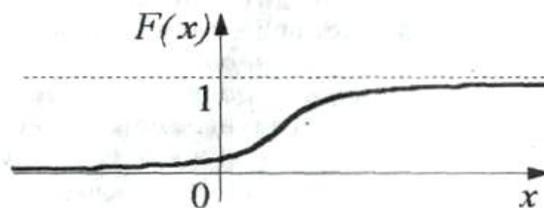


Рис.1

Из определения функции распределения вытекают два важных следствия.

Следствие 1. Вероятность того, что непрерывная случайная величина в результате испытания примет значение, принадлежащее интервалу (a, b) , равна приращению функции распределения на этом интервале:

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a), \quad (3)$$

Следствие 2. Вероятность того, что непрерывная случайная величина в результате испытания примет определенное значение a , равна нулю:

$$P(X = a) = 0, \quad (4)$$

Для задания непрерывной случайной величины можно также использовать *плотность распределения вероятностей*.

Плотностью распределения вероятностей (плотностью вероятности) $f(x)$ непрерывной случайной величины X называется производная функции распределения $F(x)$ этой величины:

$$f(x) = F'(x), \quad (5)$$

Свойства плотности распределения вероятностей:

1. Плотность вероятности является неотрицательной функцией:

$$f(x) \geq 0, \quad (6)$$

2. Вероятность того, что в результате испытания непрерывная случайная величина примет какие-либо значения из интервала $(a; b)$, равна:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx, \quad (7)$$

3. Определенный интеграл в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ от плотности вероятности непрерывной случайной величины равен единице (условие нормировки):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1, \quad (8)$$

4. Определенный интеграл в пределах от $-\infty$ до x от плотности вероятности непрерывной случайной величины равен функции распределения этой величины:

$$\int_{-\infty}^x f(x) dx = F(x), \quad (9)$$

Под основными числовыми характеристиками непрерывной случайной величины понимают, как и в случае дискретной случайной величины, математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины:

$$M(X) = \mu = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx, \quad (10)$$

Дисперсия непрерывной случайной величины:

$$D(X) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx, \quad (11)$$

Среднее квадратическое отклонение, как и для дискретной случайной величины, определяется формулой:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}, \quad (12)$$

2. Нормальный закон распределения

Из известных видов распределения непрерывных случайных величин наиболее часто используют *нормальное распределение*, которое задается *законом Гаусса*. К нормальному закону распределения при весьма часто встречающихся условиях приближаются другие законы. Так, если мы имеем сумму большого числа независимых величин, подчиненных каким угодно законам распределения, то при некоторых общих условиях она будет приближенно подчиняться нормальному закону.

Непрерывная случайная величина называется *распределенной по нормальному закону (закону Гаусса)*, если ее плотность вероятности имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (13)$$

где μ - математическое ожидание; σ^2 - дисперсия; σ - среднее квадратическое отклонение этой величины.

График плотности вероятности нормального закона распределения (*кривая Гаусса*) приведен на рис 2:

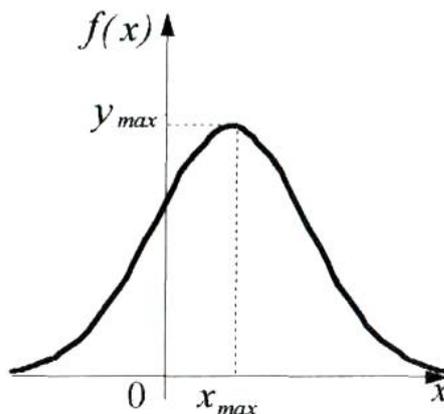


Рис.2

График симметричен относительно вертикальной прямой $x_{max} = \mu$, причем в точке $x_{max} = \mu$ функция имеет максимум, равный $y_{max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$.

Подставив выражение (13) для плотности вероятности нормально распределенной случайной величины в (7), получим вероятность того, что в результате испытания нормально распределенная случайная величина примет значение из интервала (a, b) :

$$P(a < X < b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (14)$$

Введем в рассмотрение функцию

$$\Phi(u) = \frac{1}{2\pi} \int_0^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (15)$$

где $u = \frac{x-\mu}{\sigma}$.

Тогда формулу (14) можно преобразовать к виду, удобному для практического применения

$$P(a < X < b) = \Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right), \quad (16)$$

Функция $\Phi(u)$ является нечетной, т.е. $\Phi(-u) = -\Phi(u)$; ее значения берутся из соответствующих таблиц.

Пользуясь (16), найдем вероятность того, что значение нормально распределенной случайной величины не выходит за пределы интервала $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$:

$$P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) = \Phi\left(\frac{\mu + 3\sigma - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\mu - 3\sigma - \mu}{\sigma}\right) = 2\Phi(3) \approx 0,9973$$

Это значение близко к единице. Нормально распределенная случайная величина теоретически может принимать любые значения из интервала $(+\infty, -\infty)$. Но на практике ее значения обычно не выходят за пределы интервала $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ и имеет место **правило трех сигм**: отклонения значений нормально распределенной случайной величины от ее математического ожидания по абсолютной величине практически не превышают ее утроенного среднего квадратического отклонения.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Определение случайной непрерывной величины.
2. Способы задания непрерывной случайной величины.
3. Определение функции распределения случайной непрерывной величины.
4. Определение плотности распределения вероятностей непрерывной случайной величины.
5. Основные числовые характеристики непрерывной случайной величины.
6. Нормальный закон распределения.

Студент должен уметь:

1. Находить вероятность попадания в заданный интервал значения непрерывной случайной величины, заданной функцией распределения.
2. Вычислять основные числовые характеристики непрерывной случайной величины.
3. Находить вероятность попадания значения нормально распределенной величины в заданный интервал.

4.Содержание обучения:**Теоретическая часть:**

1. Понятие непрерывной случайной величины. Способы задания непрерывной случайной величины.
2. Функция распределения случайной непрерывной величины, ее свойства, график.
3. Плотность распределения вероятностей непрерывной случайной величины, ее основные свойства.
4. Основные числовые характеристики непрерывной случайной величины: математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение.
5. Нормальный закон распределения. Кривая Гаусса.
6. Вероятность попадания значения нормально распределенной величины в заданный интервал. Правило трех сигм.

Практическая часть:

1. Найдите математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной непрерывной величины, заданной плотностью распределения вероятностей $f(x)$, равной $1/4$ на отрезке $[1,10]$ и 0 во всех остальных точках оси абсцисс.
2. Найдите вероятность попадания в интервал $(1,3)$ значения непрерывной случайной величины, заданной функцией распределения:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 1, \\ \frac{x^2 + 1}{13}, & \text{если } 1 < x \leq 3, \\ 1, & \text{если } x > 3 \end{cases}$$

3.Предполагая, что pH крови человека подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием $\mu=7,2$ и средним квадратическим отклонением $\sigma=0,2$, найдите вероятность того, что у произвольно выбранного человека уровень pH находится между $7,1$ и $7,2$.

4.Случайная величина X распределена нормально. Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение этой величины соответственно равны 6 и 2 . Найдите вероятность того, что в результате испытаний X примет значение, заключенное в интервале $(4, 8)$.

5.Предполагая закон распределения роста студентов нормальным с математическим ожиданием $\mu=175$ см и дисперсией $\sigma^2=100$ см², найдите вероятность того, что рост произвольно выбранного студента окажется в пределах от 180 до 190 см.

6.Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной непрерывной величины, заданной плотностью распределения вероятностей $f(x)$, равной $\frac{1}{3}$ на отрезке $[1,5]$ и 0 во всех остальных точках оси абсцисс.

7.Масса взрослого животного некоторого вида является нормально распределенной случайной величиной со средним значением (математическим ожиданием) 100 кг и

средним квадратическим отклонением 5 кг. Найти вероятность того, что масса животного находится в интервале:

А) от 95 до 105 кг,

Б) от 97 до 112 кг.

5.Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение непрерывной случайной величины.
2. Что называется функцией распределения случайной величины?
- 3.Что называется плотностью вероятностей непрерывной случайной величины? Как она связана с функцией распределения?
- 4.Запишите формулы для основных числовых характеристик непрерывной случайной величины.
- 5.Запишите формулу нормального распределения.

6.Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

- 1.Почему непрерывную случайную величину невозможно задать в виде таблицы ее закона распределения и с помощью формулы?
- 2.Приведите свойство функции распределения и плотности вероятности непрерывной случайной величины.
- 3.Начертите кривую Гаусса.
- 4.Сформулируйте правило трех сигм.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы –15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §8.2.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 7.2.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБОРКИ. ПОЛИГОН И ГИСТОГРАММА

1. Научно-методическое обоснование темы:

Выборочный метод представляет собой один из основных методов математической статистики – раздела математики, посвященного математическим методам систематизации, обработки и использования статистических данных. При этом систематическими данными называют сведения об объектах достаточно большой совокупности, обладающих определенными признаками.

Например, для выяснения вида закона распределения, а также оценки основных числовых характеристик такой случайной величины, как количество листьев на растениях определенного вида, необходимо провести исследование достаточно большого количества таких растений, затем по результатам высказать определенные соображения о виде закона распределения, а также провести оценку соответствующих числовых характеристик.

С другой стороны очевидно, что ввиду ограниченности количества исследуемых объектов получаемые выводы и численные результаты носят лишь приближенный характер. Степень возможной при этом погрешности, а также надежность полученных результатов можно определить, используя методы математической статистики.

2. Теория:

1. Генеральная и выборочная статистические совокупности

Множество объектов, характеризующихся некоторым качественным или количественным признаком, называется *статистической совокупностью*.

Например, статистической совокупностью является множество растворов химических соединений, различаемых как по цвету (качественный признак), так и по концентрации (количественный признак).

Статистическая совокупность, состоящая из всех объектов, которые (по крайней мере, теоретически) подлежат обследованию, называется *генеральной статистической совокупностью*. Число объектов генеральной совокупности называют ее объемом и обозначают N .

При распространении представления о конечной группе лиц на другие группы или на всю генеральную совокупность пользуются информацией о выборке. Когда врач хочет получить представление о составе и состоянии крови пациента, он проводит анализ небольшой выборки крови. Любое значение искомого параметра, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, всегда будет содержать элемент случайности. Работники здравоохранения постоянно имеют дело с информацией, базирующейся на ограниченных выборках, и они должны хорошо представлять себе границы надежности анализа информации на основе выборочных данных.

Статистическая совокупность, состоящая из некоторого количества объектов, случайным образом отобранных из соответствующей генеральной совокупности, называется *выборочной статистической совокупностью (выборкой)*. Число объектов выборки называют ее объемом и обозначают n .

Случайность отбора необходима для того, чтобы свойства выборочной совокупности наилучшим образом отражали соответствующие свойства генеральной совокупности, т.е. чтобы выборка была *представительной (репрезентативной)*.

Выборка считается составленной случайным образом, если вероятности попадания в выборку для всех членов генеральной совокупности равны.

Чем больше объектов содержит выборочная совокупность (т.е. чем больше ее *объем*), тем точнее ее свойства отражают соответствующие свойства генеральной совокупности.

2. Статистический дискретный ряд распределения

Пусть требуется изучить распределение значений признака X у объектов некоторой генеральной совокупности.

Для этого из генеральной совокупности извлекают некоторую выборку объемом.

Пусть в полученной выборочной совокупности наименьшее значение признака x_1 встречается m_1 раз, следующее по величине значение x_2 – m_2 раз, ..., x_k – m_k раз.

Наблюдаемые значения признака называются *вариантами*, а числа $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$ – их частотами.

Очевидно, что сумма всех частот равна объему выборки:

$$m_1 + m_2 + \dots + m_k = \sum_{i=1}^k m_i = n, \quad (1)$$

Результаты наблюдений представим в виде таблицы, в первой строке которой в порядке возрастания перечислены все варианты x_i , во второй – соответствующие им частоты:

Таблица 1

X	x_1	x_2	x_k
m	m_1	m_2	m_k

Такая таблица называется *статистическим дискретным рядом распределения*.

Для графического изображения такого ряда на координатной плоскости откладывают точки $(x_i; m_i)$ и соединяют их отрезками прямых (рис.1).

Полученная ломаная линия, являющаяся графическим изображением дискретного статистического ряда распределения, называется *полигоном частот*.

Наряду с частотами m_i часто применяются относительные частоты $p_i = \frac{m_i}{n}$, сумма которых равна единице:

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1, \quad (2)$$

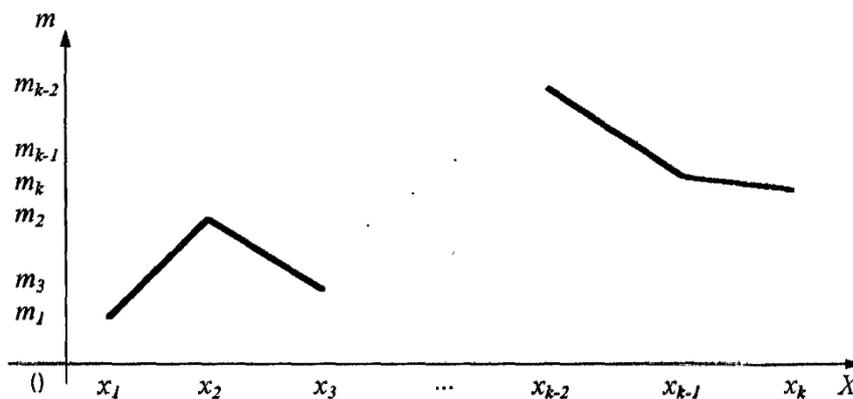


Рис.1. Полигон частот.

Тогда при построении как самого дискретного статистического ряда распределения, так и его графического изображения, называемого *полигоном относительных частот*, используют не частоты m_i , а относительные частоты p_i .

Пример. При подсчете количества листьев на каждом из 20 комнатных растений определенного вида получены следующие результаты: 11, 10, 9, 10, 7, 11, 11, 13, 10, 8, 12, 10, 9, 12, 9, 10, 8, 12, 11, 10. Составить по этим данным дискретный статистический ряд распределения и построить полигон частот.

Решение. Из полученных результатов видно, что количество листьев на растениях варьируется от 7 до 13. Значение 7 встречается 1 раз, значение 8 – 2 раза, значение 9 – 3 раза и т.д. Таким образом, можно составить следующий дискретный ряд распределения:

Таблица 2

X	7	8	9	10	11	12	13
m	1	2	3	6	4	3	1

Графическим изображением полученного ряда распределения является *полигон частот* (рис.2):

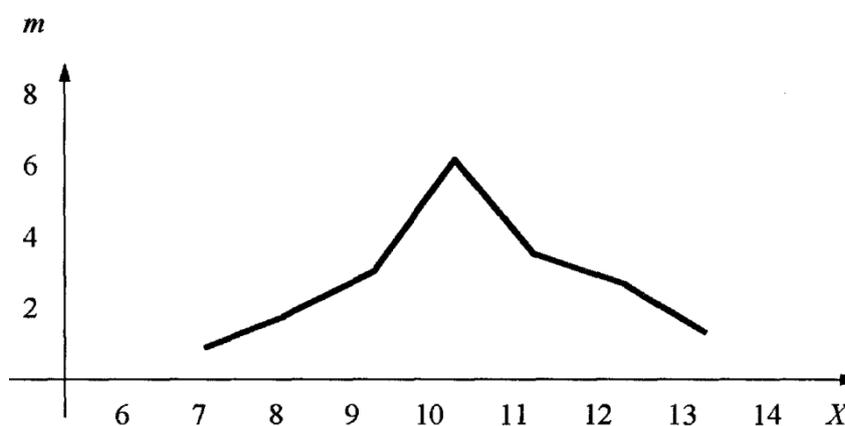


Рис.2.

3. Статистический интервальный ряд распределения

Использование дискретного ряда распределения на практике удобно лишь в случае ограниченного (не более 10-20) количества различающихся между собой вариант в выборке. Если же количество таких вариант существенно больше, то результаты представляют в виде *статистического интервального ряда распределения*.

Для построения такого ряда область наблюдаемых значений изучаемого признака разбивается на небольшое количество равных по величине интервалов и фиксируется количество значений признака в каждом интервале (*частота интервала*).

Пусть все наблюдавшиеся значения признака X принадлежат интервалу (a, b) .

Разделим этот интервал на k частичных интервалов длиной $\Delta x = \frac{b-a}{k}$ точками деления $a = x_0 < x_1 < x_2, \dots, < x_{k-1} < x_k = b$ (рис.3):

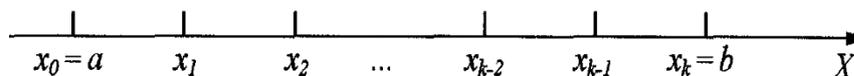


Рис.3

Составим таблицу, в первой строке которой перечислены все частичные интервалы, во второй – соответствующие им частоты (табл.3):

Таблица 3

X	(x_0, x_1)	(x_1, x_2)	(x_2, x_3)	...	(x_{k-2}, x_{k-1})	(x_{k-1}, x_k)
m	m_1	m_2	m_3	...	m_{k-1}	m_k

Такая таблица называется *статистическим интервальным рядом распределения*, а его графическим изображением является *гистограмма частот* (рис.4):

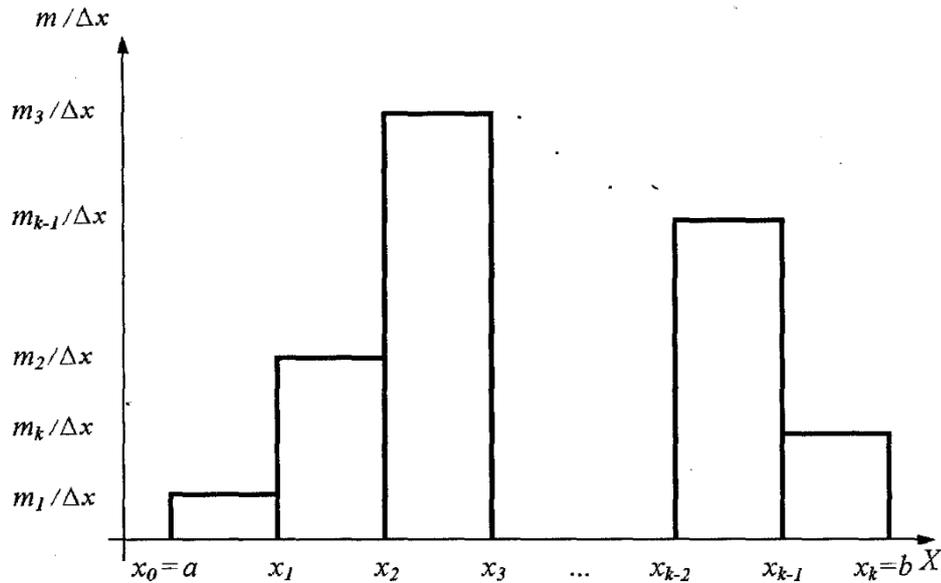


Рис.4. Гистограмма частот.

Гистограмма частот – это фигура, состоящая из прямоугольников, основаниями которых служат частичные интервалы длиной Δx , а высотами – отношения $\frac{m_i}{\Delta x}$ (*плотности частот*).

На практике часто во второй строке статистического интервального ряда распределения вместо частот m_i указывают *относительные частоты* $p_i = \frac{m_i}{n}$ (табл.4):

Таблица 4

X	(x_0, x_1)	(x_1, x_2)	(x_2, x_3)	...	(x_{k-2}, x_{k-1})	(x_{k-1}, x_k)
p	p_1	p_2	p_3	...	p_{k-1}	p_k

Тогда графическим изображением такого ряда распределения является *гистограмма относительных частот*, при построении которой по оси ординат откладывают плотность относительной частоты (рис.5). Вид гистограммы относительных частот совпадает с видом гистограммы частот. Преимуществом гистограммы относительных частот является то, что огибающая этой гистограммы (пунктирная линия на рис.5) имеет смысл графика эмпирической плотности вероятности распределения признака X .

Кроме того, представление экспериментальных данных именно в виде гистограммы плотности относительных частот необходимо, если ставится задача, например, сравнения

вида распределений двух или нескольких совокупностей. Тогда необходимо совмещение различных гистограмм, а это возможно только, если рассматриваются плотности относительных частот, что позволяет исключить зависимость от объема выборки и ширины интервала Δx . Так, в клинической практике часто приходится сравнивать разные группы пациентов, например: здоровые и больные, принимающие лекарство и не принимающие и т.п.; количество пациентов в сравниваемых группах, как правило, неодинаково (46 здоровых и 22 больных). В этом случае для сравнения можно пользоваться только гистограммой плотности относительных частот. Если же взять гистограммы плотности частот, то высота столбцов для здоровых (46) и больных (22) будет заведомо неодинакова.

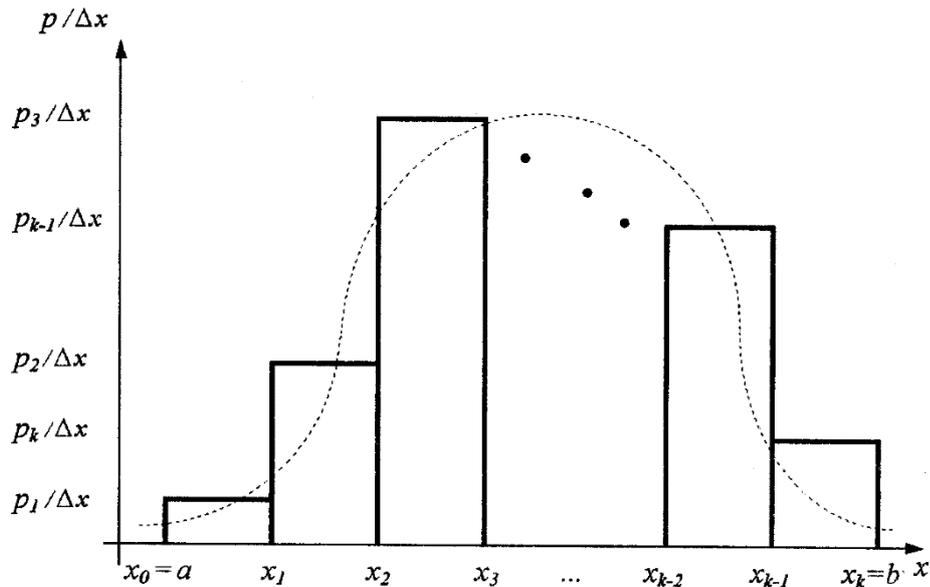


Рис.5. Гистограмма относительных частот.

При построении гистограммы очень важно правильно выбрать ширину интервала Δx . Если число интервалов k будет мало (ширина интервала Δx - велика), следует ожидать, что частично информация о случайной величине может быть потеряна. С другой стороны, если k будет слишком велико (Δx - мало), обработка результатов измерений будет излишне трудоемкой, не давая при этом существенного выигрыша в информации. Практика показывает, что рационален выбор числа интервалов k в зависимости от объема выборки с помощью табл. 5:

Таблица 5

Объем выборки, n	25-40	40-60	60-100	100-200	200
Число интервалов, k	5-6	6-8	7-10	8-12	10-15

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Определение статистической совокупности.
2. Определение генеральной статистической совокупности.
3. Определение выборочной статистической совокупности (выборки).

4. Понятие о статистическом дискретном ряде распределения.
5. Понятие полигона частот и относительных частот.
6. Понятие о статистическом интервальном ряде распределения.
7. Понятие о гистограмме частот и относительных частот.

Студент должен уметь:

1. Строить полигоны частот и относительных частот.
2. Строить гистограммы частот и относительных частот.

4.Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Определение генеральной и выборной статистической совокупностей. Объем выборки.
2. Статистический дискретный ряд распределения.
3. Полигон частот.
4. Полигон относительных частот.
5. Статистический интервальный ряд распределения.
6. Гистограмма частот.
7. Гистограмма относительных частот.

Практическая часть:

1. Из продукции, произведенной фармацевтической фабрикой, случайным образом отобраны 20 коробочек некоторого препарата, количество таблеток в которых оказалось равным соответственно 48, 52, 50, 49, 51, 50, 47, 50, 49, 50, 51, 52, 48, 51, 50, 47, 49, 46, 53, 50. Представить эти данные в виде дискретного статистического ряда распределения и построить полигон частот, а также полигон относительных частот.
2. Измерение веса P 30 студентов дало следующие результаты (в кг): 61, 67, 73, 74, 80, 68, 69, 57, 88, 82, 70, 60, 75, 76, 90, 76, 75, 58, 62, 79, 61, 69, 85, 82, 80, 66, 71, 82, 83, 80. Построить статистический интервальный ряд распределения величины P , а также гистограммы частот и относительных частот.
3. При измерении артериального давления у случайным образом отобранных 30 пациентов клиники получены следующие результаты (в мм. рт. ст.): 15!, 166, 133, 155, 179, 148, 143, 128, 138, 172, 163, 157, 158, 136, 169, 153, 142, 147, 134, 164, 167, 131, 152, 156, 161, 154, 149, 122, 176, 145. Представить эти данные в виде интервального статистического ряда распределения и построить гистограмму относительных частот.
4. Изучался рост (см) мужчин возраста 25 лет для сельской местности. По случайной выборке объема 35 получены следующие результаты: 175, 167, 168, 169, 168, 170, 172, 171, 177, 174, 167, 170, 171, 171, 172, 173, 167, 174, 172, 177, 173, 174, 173, 169, 171, 173, 173, 168, 173, 172, 166, 164, 168, 172, 174. Представить эти данные в виде интервального статистического ряда распределения и построить гистограммы частот и относительных частот.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение статистической совокупности.
2. Что называется генеральной статистической совокупностью и выборкой?
3. Что называется вариантами и их частотами?
4. Дайте определение статистического дискретного ряда распределения.
5. Что собой представляет полигон частот?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Как строится полигон относительных частот?
2. Опишите построение статистического интервального ряда распределения.

3. Что собой представляют гистограммы частот и относительных частот? (проиллюстрируйте).

4. В чем состоит преимущество гистограммы относительных частот по сравнению с гистограммой частот для непрерывного признака?

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, §§ 9.1, 9.2.
2. Павлушков И.В и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 8.1.

ТОЧЕЧНЫЕ И ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАЛЬНОЙ СОВОКУПНОСТИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Под выборочными характеристиками распределения будем понимать основные числовые характеристики выборочной статистической совокупности: среднюю выборочную, выборочную дисперсию и выборочное среднее квадратическое отклонение. Ценность этих выборочных характеристик определяется тем, что с их помощью можно оценить соответствующие числовые характеристики генеральной совокупности. Причем различают так называемые *точечные* оценки этих характеристик и их *интервальные* оценки.

2. Теория:

1. Точечные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности

Оценка характеристики распределения называется *точечной*, если она определяется одним числом, которому приближенно равна оцениваемая характеристика.

Генеральной средней \bar{X} дискретной генеральной совокупности называется среднее арифметическое всех значений изучаемого признака X в генеральной совокупности:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (1)$$

где N – объем генеральной совокупности. Формула (1) имеет лишь теоретическое значение, так как на практике имеют дело не со всей генеральной совокупностью, а только с некоторой выборкой из нее.

Наилучшей оценкой генеральной средней \bar{X} является *средняя выборочная*, определяемая как *среднее арифметическое всех значений изучаемого признака в выборке*:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i x_i, \quad (2)$$

где m_i - частота встречаемости значения x_i в выборке, k - количество вариантов, n - объем выборки.

Математическим выражением того факта, что средняя выборочная представляет собой наилучшую оценку генеральной средней, является приближенное равенство

$$\bar{X} \approx \bar{x}, \quad (3)$$

Генеральной дисперсией σ^2 называется среднее арифметическое квадратов отклонений всех значений изучаемого признака X в генеральной совокупности от генеральной средней:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2, \quad (4)$$

Наилучшей оценкой генеральной дисперсии σ^2 является так называемая *исправленная выборочная дисперсия* s^2 , определяемая по формуле

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k m_i (x_i - \bar{x})^2, \quad (5)$$

Математическим выражением того факта, что исправленная выборочная дисперсия представляет собой наилучшую оценку генеральной дисперсии, является приближенное равенство

$$\sigma^2 \approx s^2, \quad (6)$$

Генеральным средним квадратическим отклонением σ называется квадратный корень из генеральной дисперсии:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \quad (7)$$

Наилучшей оценкой генерального среднего квадратического отклонения σ является *исправленное выборочное среднее квадратическое отклонение* s , определяемое по формуле

$$s = \sqrt{s^2}, \quad (8)$$

Математическим выражением того факта, что исправленное выборочное среднее квадратическое отклонение представляет собой наилучшую оценку генерального среднего квадратического отклонения, является приближенное равенство

$$\sigma \approx s, \quad (9)$$

Пример 1. При подсчете количества листьев на каждом из 20 комнатных растений определенного вида получены следующие результаты: 11, 10, 9, 10, 7, 11, 11, 13, 10, 8, 12, 10, 9, 12, 9, 10, 8, 12, 11, 10. Дать точечные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности.

Решение. Из полученных результатов видно, что количество листьев на растениях варьируется от 7 до 13. Значение 7 встречается 1 раз, значение 8 - 2 раза, значение 9 - 3 раза и т.д. Таким образом, можно составить следующий дискретный ряд распределения:

X	7	8	9	10	11	12	13
m	1	2	3	6	4	3	1

По формуле (2) найдем среднюю выборочную:

$$\bar{x} = \frac{1}{20} (1 \cdot 7 + 2 \cdot 8 + 3 \cdot 9 + 6 \cdot 10 + 4 \cdot 11 + 3 \cdot 12 + 1 \cdot 13) \approx 10.$$

Таким образом, точечная оценка генеральной средней \bar{X} имеет вид:

$$\bar{X} \approx 10.$$

Используя значение средней выборочной \bar{x} , по формуле (5) найдем исправленную выборочную дисперсию:

$$s^2 = \frac{1}{19} [1 \cdot (7-10)^2 + 2 \cdot (8-10)^2 + 3 \cdot (9-10)^2 + 6 \cdot (10-10)^2 + 4 \cdot (11-10)^2 + 3 \cdot (12-10)^2 + 1 \cdot (13-10)^2] \approx 2,4$$

и в соответствии с (6) получим точечную оценку генеральной дисперсии σ^2 :

$$\sigma^2 \approx 2,4.$$

Далее, по формуле (8) найдем исправленное выборочное среднее квадратическое отклонение s :

$$s = \sqrt{s^2} \approx \sqrt{2,4} \approx 1,5.$$

и в соответствии с (9) получим:

$$\sigma \approx 1,5.$$

2. Интервальные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности

Оценка характеристики распределения называется *интервальной*, если она определяется двумя числами - границами интервала, содержащего оцениваемую характеристику.

В математической статистике используют так называемые *доверительные интервалы*, соответствующие заданной *доверительной вероятности*.

Доверительной вероятностью (надежностью) оценки числовой характеристики с помощью доверительного интервала называется вероятность того, что эта характеристика находится в данном интервале.

Чем шире доверительный интервал, тем выше соответствующая доверительная вероятность, и наоборот: чем большую доверительную вероятность мы хотим обеспечить, тем большим окажется соответствующий доверительный интервал.

В фармации, медицине и биологии доверительную вероятность принимают равной 0,95 или 0,99.

Рассмотрим метод нахождения доверительного интервала для заданной доверительной вероятности при оценке генеральной средней по результатам выборочных наблюдений. Предполагается, что изучаемый признак в генеральной совокупности распределен по нормальному закону. Метод основан на использовании *распределения Стьюдента* для случайной величины

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{X}}{s_x^-}, \quad (10)$$

где

$$s_x^- = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

- *исправленное среднее квадратическое отклонение средней выборочной.*

Полуширина доверительного интервала для интервальной оценки генеральной средней при заданной доверительной вероятности γ находится по формуле

$$\Delta x = t_{\gamma}(f) \cdot s_{\bar{x}}, \quad (12)$$

где $t_{\gamma}(f)$ - коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности γ и числа степеней свободы $f = n - 1$. Тогда интервальная оценка генеральной средней представляется доверительным интервалом

$$(\bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x), \quad (13)$$

в котором с доверительной вероятностью γ находится генеральная средняя \bar{X} .

Пример 2. При доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ дать интервальную оценку генеральной средней количества листьев на комнатных растениях определенного вида по данным примера 1.

Решение. Пользуясь вычисленным в примере 1 значением исправленного выборочного среднего квадратического отклонения $s \approx 1,5$, по формуле (11) найдем исправленное среднее квадратическое отклонение средней выборочной

$$s_{\bar{x}} \approx \frac{1,5}{\sqrt{20}} \approx 0,34.$$

По таблицам, для доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ и числа степеней свободы распределения Стьюдента $f = n - 1 = 19$ находим соответствующее значение коэффициента Стьюдента: $t_{0,95}(19) \approx 2,093$. По формуле (12) для полуширины доверительного интервала получаем: $\Delta x = 2,093 \cdot 0,34 \approx 1,0$.

Учитывая, что $\bar{x} \approx 10$, окончательно получаем, что с доверительной вероятностью 0,95 генеральная средняя \bar{X} количества листьев на комнатных растениях рассматриваемого вида находится в интервале (9;11).

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Понятие точечной оценки характеристики распределения.
2. Определение генеральной средней дискретной генеральной совокупности.
3. Определение генеральной дисперсии.
4. Определение исправленной выборочной дисперсии.
5. Определение интервальной оценки числовой характеристики.
6. Определение доверительной вероятности и доверительного интервала.
7. Распределение Стьюдента.

Студент должен уметь:

1. Находить точечные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности.
2. Находить интервальные оценки числовых характеристик генеральной совокупности.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Точечные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности.
2. Доверительный интервал и доверительная вероятность.

Практическая часть:

1. Из генеральной совокупности извлечена выборка объемом $n = 50$

X	2	5	7	10
m	16	12	8	14

Дать точечную оценку генеральной средней.

2. Дать точечную оценку генеральной дисперсии по данному распределению выборки объема $n = 100$

X	1250	1275	1280	1300
m	20	25	50	5

3. Найти исправленную выборочную дисперсию по данному распределению выборки объема $n = 10$

X	23,5	26,1	28,2	30,4
m	2	3	4	1

4. При подсчете количества листьев на каждом из 25 комнатных растений определенного вида получены следующие результаты: 7, 12, 10, 11, 8, 9, 10, 7, 13, 12, 8, 9, 10, 12, 11, 11, 7, 8, 9, 12, 12, 13, 13, 8, 10. При доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ дать интервальную оценку генеральной средней количества листьев на растениях.
5. При 5-кратном измерении диаметра D и высоты H цилиндра получены следующие результаты (в см):

D	4,00	4,05	3,95	3,90	4,00
H	5,1	5,0	5,0	4,9	5,1

Дать точечную и интервальную (с доверительной вероятностью, равной 0,95) оценки истинного объема цилиндра.

6. При измерении гемоглобина в крови у двух пациентов получены следующие данные:

1 пациент

Содержание гемоглобина в крови, г/л	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
	128	127	126	122	128	126	129	125

2 пациент

Содержание гемоглобина в крови, г/л	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
	85	88	90	85	86	91	88	87

Оценить доверительный интервал для средней концентрации гемоглобина в крови для данных пациентов и сравнить с нормой: $C_{\text{норм}} = 130 \pm 10$ (г/л).

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Какая оценка характеристики распределения называется точечной?
2. Запишите формулы для генеральной средней, выборочной средней, генеральной дисперсии, исправленной выборочной дисперсии, генерального среднего квадратического отклонения, исправленного выборочного среднего квадратического отклонения.
3. Что называется интервальной оценкой числовой характеристики?
4. Дайте определение доверительного интервала и доверительной вероятности.

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Чем определяется ценность выборочных характеристик распределения?
2. Запишите формулу распределения Стьюдента для случайной величины.
3. Что называется исправленным средним квадратическим отклонением средней выборочной?
4. Запишите формулу для полуширины доверительного интервала для интервальной оценки генеральной средней при заданной доверительной вероятности.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение примеров и задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Морозов Ю.В. Основы высшей математики и статистики. М., «Медицина», 2010, § 9.3.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 8.2.
3. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, § 3.2.

МАНОМЕТРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАСОСНОЙ ФУНКЦИИ СЕРДЦА, ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Манометрия (manometry) - это измерение давления внутри имеющихся в теле человека органов. В основе данного метода исследования лежит регистрация изменений заполненных жидкостью камер (например, желудочков мозга) или определение мышечной активности в таких органах человека, как прямая кишка, пищевод или желчный проток. Манометр – это прибор для измерения давления в жидкости или газе. В состав манометра часто входит U-образная трубка, заполненная ртутью, водой или какой-либо другой жидкостью. Эта трубка открыта с одного конца, а другой ее конец опущен в жидкость, находящуюся под некоторым давлением. Измеряемое давление может быть легко определено по имеющейся на манометре градуированной шкале. В данной работе изучается наиболее распространенный в медицинской практике звуковой, или аускультативный, метод непрямого измерения артериального давления по Короткову с помощью сфигмоманометра и фонендоскопа.

Кровообращение осуществляется благодаря тесному взаимодействию сердца и кровеносных сосудов. Основное задание последних заключается в том, чтобы регулировать объем периферического русла и его соответствие объема крови, а также постоянство и адекватность кровоснабжения органов и тканей. Артериальное давление является важными характеристикой состояния кровообращения. Артериальное давление — это давление крови на стенки сосудов и оно определяется силой, с которой кровь воздействует на стенки артерий. Этот показатель отражает состояние тонуса артериальных сосудов и характеризует насосную функцию сердца. Измерение артериального давления является важным диагностическим методом. Этот показатель отображает силу сокращения сердца, прилив крови в артериальную систему, сопротивление и эластичность периферических сосудов. Поэтому, изучение основных механизмов возникновения и свойств этих параметров играет важную диагностическую роль.

2. Теория:

Гемодинамика - это область биомеханики, изучающая движение крови по сосудистой системе.

1. Физическая модель системы кровообращения

Сердечно-сосудистая система в организме человека представлена сердцем, кровеносными сосудами и лимфатическими сосудами. Физическую модель сердечно-сосудистой системы можно представить в виде замкнутой, многократно разветвленной и заполненной жидкостью системы трубок с эластичными стенками. Движение жидкости происходит под действием ритмически работающего нагнетательного насоса - сердца.

В наиболее простой гидродинамической модели кровеносной системы, предложенной О. Франком, артериальная часть моделируется в виде упругого резервуара (УР). Эта модель представлена на рис.1. Кровь из сердца поступает в УР (артерии) через отверстие K_1 . При сжатии упругого резервуара содержащийся в нем объем крови проталкивается через отверстие K_2 в периферическую систему сосудов, вызывая в них продвижение крови.

Периферическая система (*артериолы, капилляры*) представляет постоянное и многократное разветвление большого числа трубок, особенно в ее средней части, общий

просвет которых имеет настолько большое сечение, что скорость жидкости здесь снижается почти до нуля.

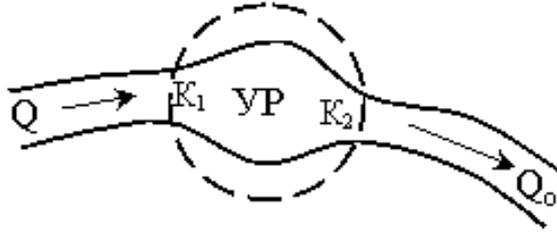


Рис.1

Однако внутреннее трение в пристеночных слоях этих трубок настолько велико, что именно эта часть системы представляет наибольшее сопротивление течению жидкости и обуславливает максимальное падение давления. Физическая модель сердечно-сосудистой системы позволяет установить связь между ударным объемом крови (объем крови, выбрасываемой желудочком сердца за одну систолу), гидравлическим сопротивлением периферической части системы кровообращения и изменением давления в артериях. Так как кровь находится в УР, то ее объем V в любой момент времени зависит от давления (p) следующим образом:

$$V = V_0 + kp, \quad (1)$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависит от эластичности упругого резервуара; V_0 - объем резервуара при отсутствии давления ($p = 0$).

Продифференцировав по времени уравнение (1), получим:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(V_0 + kp)}{dt} = k \frac{dp}{dt}, \quad (2)$$

Количество крови, протекающее через поперечное сечение сосуда за единицу времени, называется *объемной скоростью кровотока*. Пусть Q - объемная скорость кровотока, поступающего в УР, Q_0 - объемная скорость кровотока, выходящего из УР в периферическую систему. Если предположить, что гидравлическое сопротивление периферической системы постоянно, то можно записать:

$$Q = Q_0 + \frac{dV}{dt} = Q_0 + k \frac{dp}{dt}, \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что объемная скорость кровотока из сердца в артерии равна скорости оттока крови из УР и скорости возрастания объема УР.

Используя *уравнение Пуазейля* для периферической системы, можем записать

$$Q = \frac{p - p_в}{X_0} = \frac{p}{X_0}, \quad (4)$$

В (4) $X_0 = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$ - гидродинамическое сопротивление периферической системы, η - вязкость крови; l - длина сосудов; R - радиус сосуда; p - давление в упругом резервуаре; $p_в$ - венозное давление, которое может быть принято равным нулю.

Давление p в упругом резервуаре УР за время сердечного сокращения изменяется от максимального до минимального. Максимальное давление называется *систолическим* p_c , а минимальное - *диастолическим* p_d .

Экспериментальная кривая зависимости давления от времени в сонной артерии приведена на рис. 2. На рисунке показаны длительности систолы T_c и диастолы T_d , период пульса T_n , *диастолическое* (минимальное) давление p_d , *систолическое* (максимальное) давление p_c .

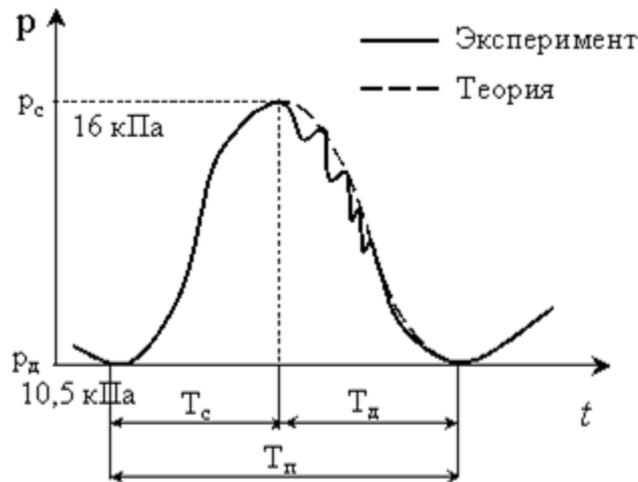


Рис.2

2. Пульсовая волна

При сокращении сердца (систола) кровь выбрасывается из сердца в аорту и отходящие от нее артерии. Особенностью системы кровообращения является эластичность стенок сосудов. Если бы стенки кровеносных сосудов были жесткими, то давление, возникающее в крови на выходе из сердца, со скоростью звука передалось бы к периферийным сосудам. Эластичность стенок сосудов приводит к тому, что во время систолы кровь выталкивается сердцем, растягивая аорту, то есть крупные сосуды воспринимают за время систолы больше крови, чем ее отток к периферии. Систолическое давление человека в норме равно приблизительно 16 кПа. Во время расслабления сердца (диастола) растянутые кровеносные сосуды сокращаются, и потенциальная энергия этих сосудов переходит в кинетическую энергию крови, которая начинает двигаться в сосудах с некоторой скоростью. При этом поддерживается диастолическое давление, примерно равное 11 кПа.

Волна повышенного давления, распространяющаяся по аорте и артериям во время систолы, называется *пульсовой волной*, которая определяет упругие и инерционные свойства системы «кровь – аорта». Скорость пульсовой волны можно оценить по формуле Моенса - Кортевега:

$$V_n = \sqrt{\frac{Eb}{2\rho r}} \quad (5)$$

Здесь E – модуль упругости стенки; ρ – плотность крови; r – внутренний радиус сосуда; b – толщина его стенки.

С возрастом, по мере уменьшения эластичности сосудов, растет модуль упругости E , что отслеживается ростом скорости распространения пульсовой волны.

Измерить скорость пульсовой волны можно следующим образом. Можно установить два датчика пульсовых колебаний на некотором расстоянии Δl друг от друга, и записать две кривые артериального пульса. Такие записи называются *санмограммами*. По двум таким записям легко определяется временной сдвиг Δt одной из них по отношению к другой. Скорость пульсовой волны:

$$V_n = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (6)$$

Зная V_n , можно с помощью формулы (5) вычислить модуль упругости E как показатель состояния сосудистой стенки. А можно обойтись и без вычислений, сравнивая измеренные значения V_n со значениями, характерными для нормы.

Наряду с эластичными волокнами, стенки сосудов данного типа имеют значительное количество коллагеновых волокон, природное предназначение которых – обеспечение прочности тканей. Однако прочностные способности этих волокон способны проявиться лишь при значительных деформациях стенок сосудов. Это объясняется рыхлой укладкой коллагеновых волокон. Они как бы спутаны, и начинают проявлять прочность, только когда распрямляются при больших деформациях стенок.

Наличие прочных нитей коллагеновых волокон обеспечивает возможность работы сосудов в условиях очень больших нагрузок на систему кровообращения, вплоть до десятикратного роста артериального давления.

Артерии мышечного типа, меняя тонус, меняют распределение давления крови по органам и тканям. В системе кровообращения нет кранов и задвижек, но есть артерии мышечного типа – *артериолы*. Их численность – несколько сот тысяч; суммарная площадь сосудистого русла получается весьма внушительной, а потому перепад давлений на системе артериол достаточно велик, несмотря на параллельную работу их ветвей. Так, если давление в аорте во время систолы достигает 115 - 130 мм рт.ст., то у начала артериол оно составляет 70 - 80 мм, а у начала капилляров – 20 - 40 мм рт.ст. Природная логика здесь примерно такова: артериола должна иметь заметное гидравлическое сопротивление, и тогда она может своим мышечным тонусом менять его в обе стороны: как в сторону понижения, так и в сторону повышения. Будь у нее очень малое сопротивление, она могла бы работать, регулируя систему только на повышение давления, что было бы гораздо менее эффективно.

Изменения тонуса в отдельных звеньях системы артериол обеспечивают повышенный кровоток в тех органах, которые в данный момент в этом нуждаются, как в связи с физическими нагрузками, так и в ходе регулирования теплообмена организма с окружающей средой.

Помимо изложенного, система артериол передает пульсовую волну, которая окончательно затухает лишь на входе в капилляры.

Примеры системных нарушений в работе этого участка кровеносной системы – гипертония и гипотония.

Для сравнения отметим, что и с какой скоростью происходит в системе кровообращения.

1. *Скорость кровотока* – величина порядка 1 м/с в артериях и порядка 1 мм/с в капиллярах.
2. *Скорость пульсовой волны* – величина порядка 5-10 м/с, и это вовсе не скорость движения частиц крови или стенок сосудов.
3. *Скорость звука в жидкостях* – величина порядка 1000 м/с.

В соответствии с формулой (6), скорость венозной пульсовой волны меньше, чем артериальной. Она может быть измерена по записям венозного пульса. Такие записи называются *флебограммами*. Пульсовая волна распространяется со скоростью 5 - 10 м/с, поэтому за время систолы (T_c - 0,3 с) она должна пройти расстояние от сердца до конечностей. Это означает, что фронт пульсовой волны достигает конечностей раньше, чем начнется диастола. Пульсовой волне соответствует пульсирование скорости кровотока в крупных артериях, однако скорость крови существенно меньше скорости распространения пульсовой волны и, примерно, равна 0,3 - 0,5 м/с. При этом ток крови принимает непрерывный характер.

При таком механизме продвижения крови только часть энергии, развиваемой мышцей при сокращении, передается непосредственно крови в аорте и переходит в ее кинетическую энергию. Остальная часть энергии переходит в потенциальную энергию растяжения эластичных стенок крупных сосудов и затем уже по мере возвращения их в исходное состояние эта энергия передается крови в период диастолы. Этим и объясняется непрерывный характер тока крови.

На рис. 3 приведены графики изменения давления и скорости движения крови в основных частях сосудистой системы. Давление (p) - это избыточное давление над атмосферным.

Движение крови по сосудам, особенно распределение ее между различными частями кровеносной системы, зависит не только от работы сердца, но и от общего просвета сосудов. В эластичных стенках сосуда имеются гладкие мышечные волокна, от степени сокращения которых зависит просвет сосуда. Имеет значение также общее количество циркулирующей крови и ее вязкость. Все эти факторы находятся под регулирующим влиянием центральной нервной системы.

Таким образом, физиологические факторы, накладываясь на физические закономерности, регулируют кровообращение в различных участках.

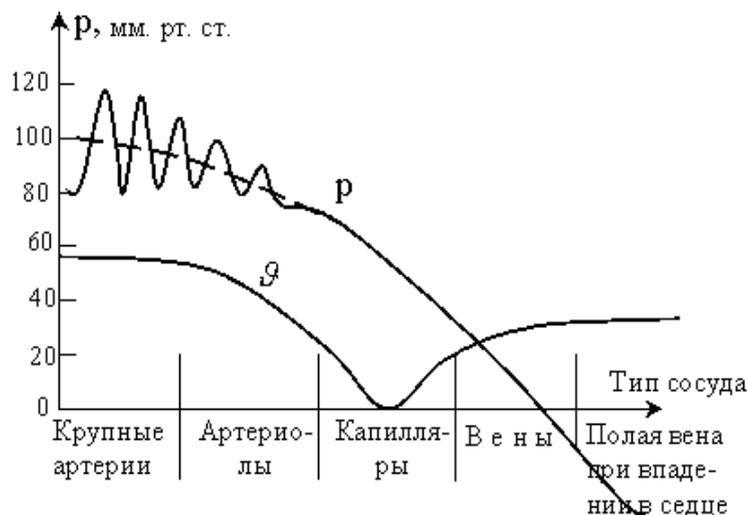


Рис.3

3. Физические основы клинического метода измерения давления крови

Знание давления крови играет важную роль при диагностике многих заболеваний и при контроле за эффективностью проводимого лечения. Систолическое и диастолическое давление в артерии можно измерить непосредственно с помощью иглы, соединенной с манометром. Однако в медицине широко используется бескоротный метод,

предложенный более ста лет назад сотрудником Военно-Медицинской академии Н.С.Коротковым. Он заключается в том, что измеряют давление, которое необходимо приложить снаружи, чтобы сжать артерию до прекращения в ней тока крови. Это давление весьма близко к давлению крови в артерии. Измерение обычно производится на плечевой артерии выше локтевого сгиба (рис. 4).

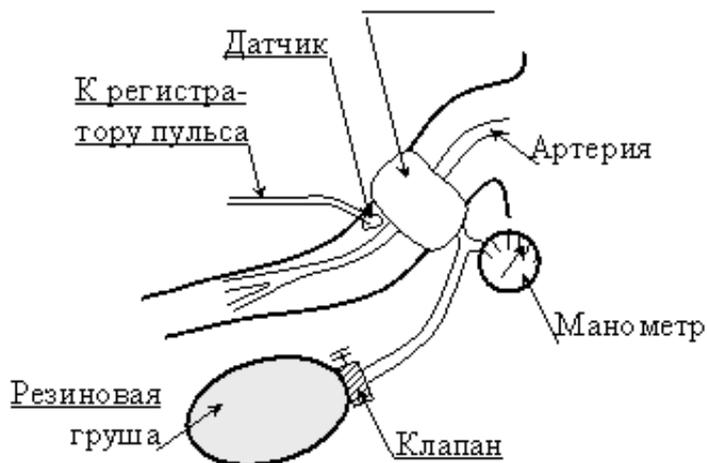


Рис.4

Сжатие артерии осуществляется с помощью манжеты, которая представляет собой резиновую камеру в чехле из тонкого материала. Манжету обертывают вокруг руки между плечом и локтем. При накачивании воздуха через шланг с помощью резиновой груши давление в манжете растет. Величина давления определяется по манометру, соединенному с манжетой. В процессе накачивания воздуха в манжету следят за пульсом на лучевой артерии с помощью датчика (фонендоскоп или пьезоэлектрический преобразователь). Воздух накачивают в манжету до давления на 10 - 30 мм рт.ст. выше того, при котором перестает прослушиваться пульс на лучевой артерии. Затем, медленно открывая выпускной клапан резиновой груши, постепенно снижают давление в манжете, прислушиваясь к звукам в фонендоскопе. Соотношение между изменением давления (p) в манжете и "тонами Короткова" показано схематически на рис. 5. Пока артерия сжата полностью, никакие звуки не прослушиваются. При снижении в манжете давления начинают прослушиваться отчетливые тоны (участок a на рис. 5).

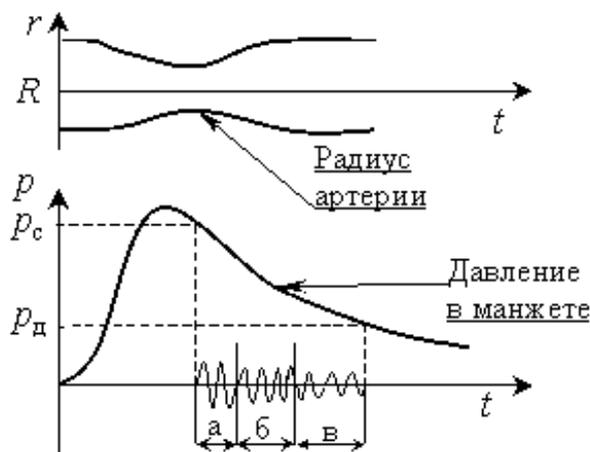


Рис.5

Эти тоны обусловлены вибрацией стенок артерии непосредственно за манжетой под действием мощных толчков крови, которые проходят сквозь сжатый манжетой участок сосуда только в моменты систолы сердца. Показание манометра, соответствующее моменту появления тонов, определяет систолическое давление.

При дальнейшем снижении давления в манжете тоны дополняются шумами (участок *б* на рис. 5). Эти шумы обусловлены турбулентным течением крови через частично сжатый манжетой участок артерии. Затем шумы уменьшаются и в фонендоскопе вновь прослушиваются чистые тоны (участок *в* на рис. 5). Эти тоны быстро затухают, в артерии устанавливается ламинарное течение крови. Показание манометра в момент резкого ослабления тонов соответствует диастолическому давлению.

Для здорового нормального человека $p_c = 100 - 120$ мм рт.ст., $p_d = 60 - 80$ мм рт.ст.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В лабораторной работе используется механический измеритель артериального давления. Внешний вид измерителя изображен на рис. 6.



Рис. 6

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Измерение артериального давления на правой руке

1. Прежде чем надеть манжету, определите место наибольшей пульсации плечевой артерии. Чаще всего это место расположено на 3 – 5 см выше локтевого сгиба, на поверхности предплечья, обращенной к туловищу.

2. НАЛОЖЕНИЕ МАНЖЕТЫ. Проденьте конец манжеты через металлическое кольцо так, чтобы точка входа воздушной трубки в манжету располагалась с внешней стороны над локтевой ямкой. Проденьте руку в образовавшееся кольцо так, чтобы воздушная трубка выходила по направлению к вашей ладони. При этом головка стетоскопа, встроенная в манжету должна находиться на 3-5 см выше сгиба локтя на стороне плеча, обращенного к туловищу.

3. Положите руку на стол так, чтобы точка входа воздушной трубки в манжету располагалась над локтевой ямкой и находилась на уровне сердца.

4. Закройте воздушный клапан, расположенный на нагнетателе, повернув винт по часовой стрелке. Прислушайтесь к пульсу и наблюдайте за показаниями манометра. После того,

как перестали слышать пульс, продолжайте нагнетать воздух в манжету, увеличив давление в ней на 30-40 мм. рт. ст.

5. *Измерение систолического давления.* Медленно откройте воздушный клапан, поворачивая винт против часовой стрелки таким образом, чтобы давление в манжете падало со скоростью 2-3 мм.рт.ст. Показание манометра, соответствующее моменту появления тонов, определяет систолическое (верхнее) артериальное давление.

6. *Измерение диастолического давления.* Продолжайте выпускать воздух. В тот момент когда звук перестанет быть слышен стрелка манометра будет показывать значение диастолического (нижнего) артериального давления.

7. Занесите в таблицу 1 результаты измерения систолического и диастолического давлений.

Точный отсчет показаний манометра, соответствующих систолическому и диастолическому давлению, требует наличия определенных навыков, которые можно приобрести, выполняя данную работу. Необходима адекватная реакция на слуховые и зрительные воздействия, непрерывно получаемые при измерении.

Таблица 1

№ п/п		P_c (мм рт. ст.)	P_d (мм рт. ст.)
1	Правая рука		
2	Левая рука		
3	Левая рука после нагрузки		

Задание 2. Измерение артериального давления на левой руке

Измерьте артериальное давление на правой руке, запишите результаты измерений. Сравните эти значения с результатами задания 1, объясните возможные расхождения в результатах измерений.

Задание 3. Измерение артериального давления на левой руке после интенсивной физической нагрузки

Обследуемый, не снимая манжеты, совершает 20 приседаний, затем производится повторное измерение артериального давления.

Сравните все полученные значения с нормальными значениями давления и с результатами заданий, объясните возможные расхождения в результатах измерений.

Ошибки измерения артериального давления состоят, главным образом, в том, что показания манометра считываются чуть раньше или чуть позже, чем следует. Это приводит к завышению или занижению результатов измерений. Своевременность реакций достигается практикой.

Наряду с тем, что результаты измерения артериального давления могут зависеть от навыков измеряющего, они могут значительно зависеть от текущего психического состояния пациента. Например, установлено, что если давление измеряет врач, то оно оказывается несколько выше, чем в случае, когда измерения выполняет медсестра. Проявляется неодинаковость реакций психики пациента на врача и медсестру.

3. Цель деятельности студентов на занятии:**Студент должен знать:**

1. Гидродинамическую модель кровеносной системы.
2. Понятие пульсовой волны.
3. Происхождение звуков, слышимых при измерении артериального давления.
4. Понятия систолического и диастолического артериального давления.
5. Физические основы клинического метода измерения давления крови.
6. Ошибки измерения артериального давления. Способы их уменьшения.

Студент должен уметь:

1. Объяснять связь между ударным объемом крови, гидравлическим сопротивлением периферической части системы кровообращения и изменением давления в артериях.
2. Измерять артериальное давление по методу Короткова.

4. Содержание обучения:

1. Физическая модель системы кровообращения.
2. Объемная скорость кровотока.
3. Уравнение Пуазейля для периферической системы сосудов.
4. Гидравлическое сопротивление периферической системы.
5. Скорость пульсовой волны.
6. Систолическое и диастолическое артериальные давления.
7. Физические основы клинического метода измерения давления крови.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение манометрии.
2. Что называется артериальным давлением?
3. Дайте определение гемодинамики.
4. Что называется пульсовой волной?
5. Чему равна объемная скорость кровотока из сердца в артерии?
6. Объясните происхождение звуков, слышимых при измерении артериального давления.
7. Как можно измерить скорость пульсовой волны?
8. Как можно вычислить модуль упругости E сосудистой стенки?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Объясните непрерывный характер тока крови.
2. Как формируется систолическое давление крови человека?
3. Как формируется диастолическое давление крови человека?
4. От чего зависит скорость распространения пульсовой волны?
5. Запишите связь между объемной скоростью кровотока и гидравлическим сопротивлением периферической части системы кровообращения (уравнение Пуазейля).
6. Опишите метод непрямого измерения артериального давления по Короткову с помощью сфигмоманометра и фонендоскопа.
7. Опишите назначение и принцип работы механического измерителя артериального давления.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 20 мин.
3. Пояснение к выполнению работы – 5 мин.
4. Выполнение работы – 40 мин.
5. Проверка работы – 20 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 9.1–9.5.
2. Федорова В.Н., Фаустов Е.В. Медицинская и биологическая физика. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2010, §§ 9.1–9.5.
3. Физика и биофизика (под ред. В.Ф.Антонова). М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 21.2-21.4.

АУДИОМЕТРИЯ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Звуковые волны являются одним из главных источников информации об окружающем нас мире. Благодаря им мы можем разговаривать друг с другом, слышать друг друга и различные источники звука.

Звук является источником информации о состоянии внутренних органов человека. Для медицины важны акустические понятия для оценки слуховых ощущений, поэтому необходимо изучение основных характеристик звука: субъективных (высота, громкость и тембр) и объективных (частота, интенсивность, акустический спектр).

2. Теория:

Звук - распространяющееся в виде продольных волн колебательное движение частиц упругой среды: газообразной, жидкой или твердой.

Термин «звук» употребляется также для обозначения ощущения, вызываемого действием звуковых волн на органы слуха человека и животных. Человек слышит звуки частотой от 16 Гц до 20000 Гц.

Отметим, что физическое понятие о звуке охватывает волны как слышимого, так и неслышимого диапазона.

Звук с частотой ниже слышимого диапазона называется *инфразвуком*, выше - *ультразвуком*.

Звуки разделяются на *тоны* (музыкальные звуки), *шумы* и *звуковые удары*. *Тоном* называется звук, являющимся периодическим процессом. Если этот процесс гармонический, то тон называется *простым* (например, звук камертона).

К *сложным* тонам относятся ангармонические колебания (например, гласные звуки речи человека, звуки музыкальных инструментов). Сложный тон может быть разложен на простые. Наименьшая частота ν_0 такого разложения соответствует *основному тону*. Остальные гармоники (*обертоны*) имеют частоты, равные $2\nu_0$, $3\nu_0$, и т.д. Набор частот с указанием их амплитуды называется *акустическим спектром*. Спектр сложного тона – *линейчатый* (рис.1).

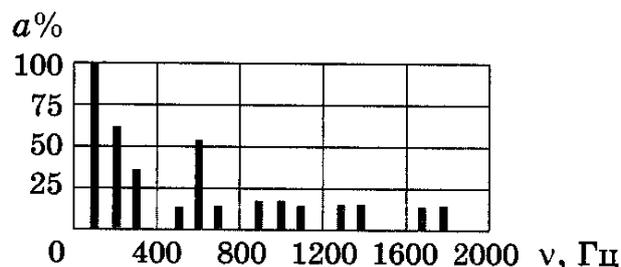


Рис.1

Шумом называется звук, отличающийся сложной неповторяющейся временной зависимостью (согласные звуки речи, аплодисменты, звуки от вибрации машин и т.д.). Шум можно рассматривать как сочетание беспорядочно изменяющихся сложных тонов. Спектр шума сплошной (рис.2).

Звуковой удар – это кратковременное звуковое воздействие (например, взрыв, хлопок).

Энергетической характеристикой звука как механической волны является интенсивность. Но на практике для оценки звука удобнее использовать звуковое давление, которое дополнительно возникает при прохождении звуковых волн в жидкостях или газах.

Интенсивность I и звуковое давление p связаны соотношением

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}, \quad (1)$$

где ρ - плотность среды, c - скорость звука.

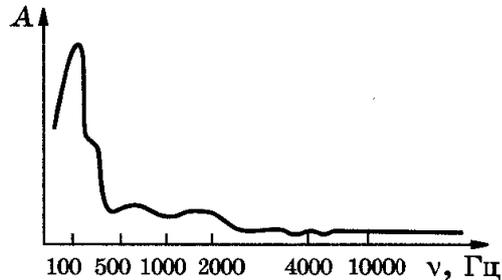


Рис.2

В слуховом ощущении субъективно различаются *высота, громкость и тембр* звука. Каждая из этих характеристик, в свою очередь, зависит от физических величин, имеющих объективный смысл: *частоты и интенсивности* звуковой волны.

Высота тона зависит от частоты колебаний. Чем больше частота, тем выше кажется звук.

Музыкальные звуки с одним и тем же основным тоном различаются тембром, который, в основном, определяется частотами и амплитудами обертонов. Мы узнаем знакомые голоса и музыкальные инструменты именно по тембру.

Громкость звука зависит от интенсивности звука. Человеческое ухо чувствительно к звукам, интенсивность которых меняется в невероятно широких пределах.

Наименьшая интенсивность звуковой волны, которая может быть воспринята органами слуха называется *порогом слышимости* I_0 .

Стандартный порог слышимости принимается равным

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

при основной частоте 1 кГц.

Наибольшая интенсивность звуковой волны, при которой восприятие звука не вызывает болевого ощущения, называется *порогом болевого ощущения* или *порогом осязания*. Порог осязания зависит от частоты звука и изменяется от 0,1 Вт/м^2 при 6 кГц до 10 Вт/м^2 при низких и звуковых частотах.

Поскольку диапазон интенсивностей воспринимаемых нами звуков очень велик (самый громкий звук, который способно воспринимать наше ухо, имеет интенсивность в 10^{13} раз больше интенсивности самого тихого звука, который мы еще можем услышать), удобно сравнивать интенсивности звуков в логарифмической шкале. В этой шкале уровень интенсивности звука выражается в *белах* (Б). Если уровень какого-то звука на 1Б выше, чем у другого, то отношение интенсивностей этих звуков равно 10. Если уровни звуков различаются на 2Б, то отношение их интенсивностей 10^2 и т.д.

Обычно уровни интенсивностей звуков выражают в децибелах (дБ):

$$1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б.}$$

При построении шкалы уровней интенсивности звука значение I_0 принимают за начальный уровень шкалы; любую другую интенсивность I выражают через десятичный логарифм ее отношения к I_0 :

$$L_B = \lg \frac{I}{I_0}, \quad (2)$$

или при использовании децибел

$$L_{дБ} = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (3)$$

В основе создания шкалы уровней громкости лежит психофизический **закон Вебера-Фехнера**: *если раздражение увеличивается в геометрической прогрессии (т.е. в одинаковое число раз), то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (т.е. на одинаковую величину).*

Применительно к звуку это означает, что если интенсивность звука принимает ряд последовательных значений, например $aI_0, a^2I_0, a^3I_0, \dots$ (a – некоторый коэффициент, $a > 1$), то соответствующие им ощущения громкости звука $E_0, 2E_0, 3E_0, \dots$

Математически это означает, что громкость звука пропорциональна логарифму интенсивности звука. Если действуют два звуковых раздражения с интенсивностями I и I_0 , причем I_0 – порог слышимости, то на основании закона Вебера-Фехнера громкость относительно I_0 связана с интенсивностью следующим образом:

$$E = k \lg \frac{I}{I_0}, \quad (4)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Сильная зависимость k от частоты и интенсивности не позволяет измерение громкости свести к простому использованию формулы (4).

Условно считают, что на частоте 1 кГц шкалы громкости и интенсивности звука полностью совпадают, и по аналогии с (3)

$$E_\phi = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (5)$$

Для отличия от шкалы интенсивности звука в шкале громкости децибелы называют **фонами** (фон).

Громкость на других частотах можно измерить, сравнивая исследуемый звук со звуком частотой 1 кГц.

На практике громкость звука можно оценить по так называемым *кривым равной громкости*, представленным на рис.3.

Каждая из представленных кривых объединяет звуки одной и той же громкости, измеряемой в фонах. При этом принято, что громкость любого звука в фонах совпадает с уровнем интенсивности равногромкого звука (в децибелах) на частоте 1 кГц: кривой порога слышимости соответствует уровень громкости 0 фон; ближайшей к ней –10 фон; следующей –20 фон и т.д. (см. рис.3).

Из анализа кривых равной громкости видно, что два звуковых сигнала, которым соответствует одинаковая интенсивность (например, звук частоты 50 Гц и уровня

интенсивности 70 дБ и звук такого же уровня интенсивности и частоты 1000 Гц), имеют различные уровни громкости - первый из представленных выше звуковых сигналов имеет уровень громкости 30 фон, второй-70 фон.

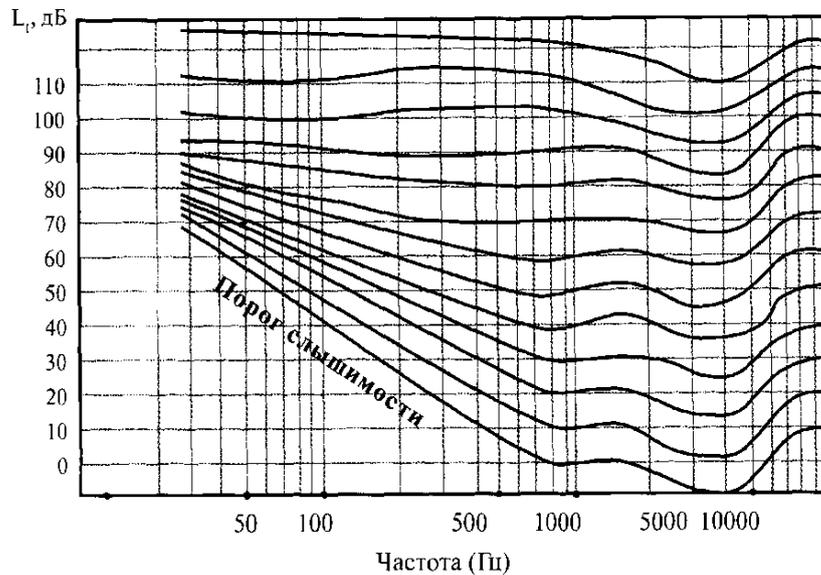


Рис.3

Метод измерения остроты слуха называется *аудиометрией*: на специальном приборе (*аудиометре*) определяют порог слухового ощущения на разных частотах; полученная кривая называется *аудиограммой*. Сравнивая аудиограмму пациента с нормальной кривой порога слухового ощущения, можно диагностировать заболевание органов слуха.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе используется аудиометр автоматизированный АА-02 (рис.4).



Рис.4

Аудиометр АА-02 предназначен для оценки функционального состояния слухового аппарата человека путем определения порогов слышимости по воздушному и костному звукопроведению методом сравнения слуха обследуемого с характеристиками, эквивалентными порогу слышимости нормального человека, а также путём проведения надпороговых тестов.

Функциональные возможности аудиометра:

- Определение порогов слышимости тональных сигналов по воздушному и костному звукопроведению.
- Применение маскирующего шума.
- Два режима работы при определении порогов: автоматизированный и ручной.
- Режим надпороговых тестов.
- Программирование процедуры обследования в автоматизированном режиме.
- Воспроизведение результатов обследования на индикаторе.
- Индикация текущих параметров сигнала и ответов обследуемого.
- Звуковая сигнализация о завершении процесса обследования в автоматизированном режиме и режиме надпороговых тестов.
- Вывод результатов обследования на компьютер или термомпринтер.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости

1. Подключите телефон, кнопку пациента и сетевой шнур к соответствующим разъёмам на задней панели аудиометра.
2. Подключите аудиометр к сети.
3. Включите аудиометр (сетевой тумблер находится на задней панели).
4. На индикаторе аудиометра появится следующее изображение:

ТОН: 1000 Hz	ПОДАЧА
ПРАВОЕ ВОЗД.	АВТОМАТ

5. Наденьте оголовье с телефонами (на правом ухе должен находиться “красный” телефон, на левом – “голубой”).
6. Нажмите кнопку **СБРОС**.
7. Нажмите кнопку **АВТ**.
8. Нажимайте кнопку **ОТВЕТ** при появлении звука в телефонах. После каждого нажатия отпускайте кнопку.

Подача звука отображается на индикаторе звёздочками:

ТОН: 1000Hz	50dB	***ПОДАЧА***
ПРАВОЕ ВОЗД.	АВТОМАТ	ТРЕНИРОВКА

9. После определения порогов правого уха процесс обследования автоматически повторяется на левом ухе с тем же порядком предъявления частот.
10. При завершении программы определения порогов по воздушной проводимости в аудиометре раздаётся звуковой сигнал и аудиометр автоматически переходит в режим воспроизведения. На индикаторе появляются результаты обследования, например:

ЛЕВ.ВОЗД. Hz	125	250	500	750	1000	1500
ВОСПР. dB	45	35	30	---	10	15

11. Внесите результаты собственных обследований в таблицу:

Частота, Гц		125	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
Порог, дБ	Левое ухо											
	Правое ухо											

12. Постройте на бланке аудиограммы (рис.5) графики зависимости интенсивности звука от частоты для правого и левого уха.

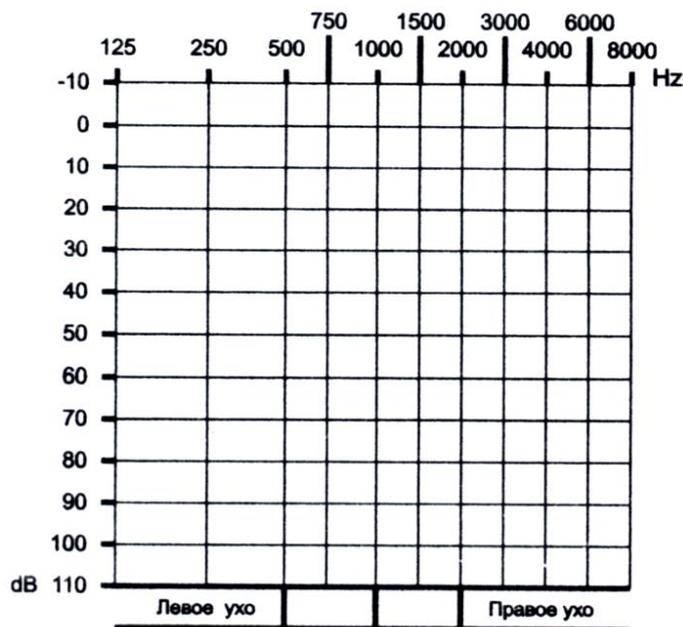


Рис.5

Задание 2. Решите ситуационные задачи:

1. Звук какого уровня громкости E , фон услышит человек, если на него падают звуковые волны с частотой 1000 Гц и интенсивностью 10^{-10} Вт/м²?
2. Уровень громкости звука от одного человека на частоте 1000 Гц $E = 40$ фон. Какой уровень громкости звука E создадут 30 одновременно говорящих людей?
3. Одиночный комар, находящийся на расстоянии 10 м от человека, создает звук, равный порогу слышимости I_0 на частоте 1000 Гц. Какой уровень громкости E , фон создадут 5000 комаров, находящихся на таком же расстоянии?
4. Работа стоматологической турбины сопровождается шумом с уровнем громкости $E = 35$ фон. Компрессор слюноотсоса создает шум с уровнем громкости $E = 40$ фон. Определите уровень громкости в фонах, который сопровождает одновременную работу турбины и слюноотсоса ($\nu = 1000$ Гц).
5. Потеря слуха у пациента на частоте 1 кГц составляет $\Delta L = 30$ дБ. Определите минимальную интенсивность I (Вт/м²) волны, которая на это частоте вызывает у пациента ощущение звука.
6. Чему равно отношение интенсивностей звука I_1/I_2 , если различие в уровнях интенсивностей $\Delta L = 40$ дБ?
7. Разрыв барабанной перепонки наступает при уровне интенсивности звука $L = 150$ дБ. Определите интенсивность, амплитудное значение звукового давления и амплитуду

смещения частиц в волне для звука с частотой $\nu = 1$ кГц, при которой может наступить разрыв барабанной перепонки.

8. На рис.6 представлены кривые равной громкости. Определите уровень громкости E , фон на частоте 200 Гц. Уровень интенсивности $L=40$ дБ.

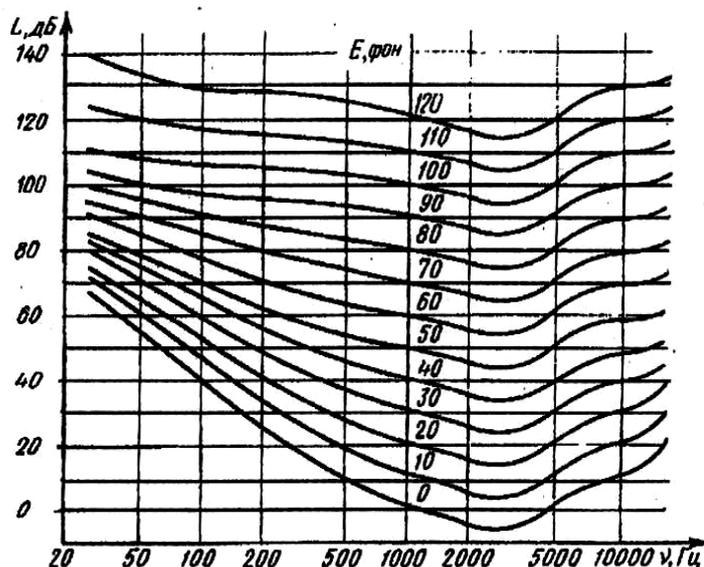


Рис.6

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Виды звуков.
2. Объективные и субъективные характеристики слухового ощущения.
3. Закон Вебера-Фехнера.
4. Единицы шкал уровней интенсивности и громкости звука.

Студент должен уметь:

1. Объяснять зависимость физиологических характеристик ощущения звука от физических характеристик звуковой волны.
2. Строить аудиограмму.
3. Решать ситуационные задачи.

4. Содержание обучения:

1. Звук. Виды звуков: тоны, шумы, звуковые удары. Простой и сложный тон.
2. Акустический спектр. Звуковое давление.
3. Характеристики слухового ощущения.
4. Построение шкалы уровней интенсивности.
5. Закон Вебера-Фехнера.
6. Построение шкалы уровней громкости.
7. Аудиометрия. Кривые равной громкости.
8. Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости.
9. Решение ситуационных задач.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Что называют звуком? Какие существуют виды звуков?
2. Что называется простым и сложным тоном, шумом, звуковым ударом?
3. Что представляют собой обертоны?

4. Перечислите физические характеристики звука. В каких единицах они измеряются?
5. Что называется акустическим спектром? Приведите акустические спектры сложного тона и шума.
6. Что называется аудиограммой ?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Опишите методы построения шкал уровней интенсивности и громкости звука.
2. Перечислите характеристики слухового ощущения и укажите, как они связаны с физическими характеристиками звука.
3. Сформулируйте закон Вебера-Фехнера.
4. Опишите назначение и принцип работы аудиометра.
5. Охарактеризуйте методы аускультации, перкуссии и фонокардиографии.

7. Самостоятельная работа студентов:

По учебнику Ремизова А.Н и др.(§6.3) изучите физические основы звуковых методов исследования в клинике.

8. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 20 мин.
3. Пояснение к выполнению работы – 5 мин.
4. Выполнение работы – 40 мин.
5. Проверка работы – 20 мин.

9. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 6.1, 6.2, 6.6.
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §§ 7.4, 7.5
3. Физика и биофизика (под ред. В.Ф.Антонова). М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 3.1.-3.3., 4.1.- 4.3.
4. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 3.2.

ДОПЛЕРОМЕТРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА КРОВИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Медико-биологические приложения ультразвука делятся на два направления: методы диагностики и исследования; методы воздействия.

К первому направлению относятся эхоэнцефалография, ультразвуковая локация, ультразвуковая кардиография, доплерометрия. Высокая чувствительность ультразвуковой аппаратуры позволяет получить эхограмму мягких тканей, проследить за движущимися объектами, например, за частотой сердечных сокращений, скоростью кровотока в крупных сосудах. С помощью ультразвука достаточно точно определяются размеры внутренних органов и их частей, опухоли, кровоизлияния, инородные тела, камни и др. Это обуславливает широкое признание метода и его внедрение во многих областях медицины: хирургии, офтальмологии, акушерстве и гинекологии, онкологии, спортивной и космической медицине.

Безопасность и эффективность лечения больных в большой мере зависит от полноты информации, которой располагает врач. Одним из важных источников такой информации является доплерометрия. С помощью доплерометрии врач может увидеть структуру и протяженность кровеносных сосудов, измерить скорость движения крови по сосудам, а также определить диаметр сосудов и выявить их закупорку.

2. Теория:

1. Источники и приемники ультразвука

Ультразвуком (УЗ) называют механические колебания и волны, частоты которых более 16-20 кГц.

Нижняя граница области ультразвуковых частот, отделяющая ее от области слышимого звука, определяется субъективными свойствами человеческого слуха и является условной, поскольку верхняя граница слухового восприятия человека имеет значительный разброс для различных индивидуумов. Верхняя граница ультразвуковых частот обусловлена физической природой упругих волн, которые могут распространяться лишь в материальной среде, т.е. при условии, что длина волны значительно больше длины свободного пробега молекул в газах или межатомных расстояний в жидкостях и твердых телах. В газах граничная частота $\sim 10^9$ Гц, в жидкостях и твердых телах $\sim 10^{12}$ - 10^{13} Гц.

Хотя физическая природа ультразвука такая же, что для звуковых волн любого диапазона частот, он обладает рядом специфических особенностей, которые определяют его большое значение в науке и технике. Эти особенности обусловлены относительно *высокими частотами* и соответственно *малостью длин волн*.

Малость длины волны обуславливает *лучевой характер распространения* ультразвуковых волн. Вблизи излучателя ультразвуковые волны распространяются в виде пучков, поперечный размер которых сохраняется близким к размеру излучателя. Попадая на крупные препятствия или неоднородности в среде, такой ультразвуковой луч испытывает *отражение* и *преломление*. При попадании луча на малые препятствия или дефекты возникает *рассеянная волна*. Это позволяет обнаруживать в среде весьма малые неоднородности, порядка десятых и сотых долей мм.

В природе ультразвук встречается как в качестве компоненты многих естественных шумов, так и среди звуков животного мира. Некоторые животные пользуются ультразвуковыми волнами для обнаружения препятствий (летучие мыши, дельфины, некоторые виды птиц, обитающие в темных пещерах). Способностью к испусканию и восприятию ультразвуковых волн обладают некоторые насекомые (сверчки, цикады,

отдельные виды бабочек). Как правило, животные пользуются для локации частотами от десятков до сотен кГц. Некоторые млекопитающие, например собаки, кошки, также обладают способностью восприятия ультразвука с частотой до сотен кГц.

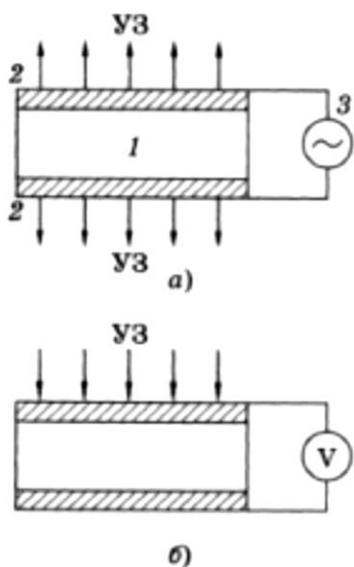


Рис.1

Искусственные излучатели ультразвука основаны на явлении магнитострикции (при более низких частотах) и обратного пьезоэлектрического эффекта (при более высоких).

Магнитострикция заключается в незаметных для глаза колебаниях (удлинении и укорочении) длины ферромагнитного сердечника под действием переменного магнитного поля в соответствии с частотой изменения знака поля.

Из искусственных излучателей ультразвука наибольшее распространение получили электромеханические излучатели, основанные на явлении *обратного пьезоэлектрического эффекта*, который заключается в механической деформации тел под действием электрического поля. Основной частью такого излучателя (рис.1, а) является пластина 1 из

вещества с хорошо выраженными пьезоэлектрическими свойствами (кварц, титанат бария и т.д.). На поверхность пластины в виде проводящих слоев нанесены электроды 2. Если к электродам приложить переменное электрическое напряжение от генератора 3, то пластина благодаря обратному пьезоэффекту начнет вибрировать, излучая механическую волну соответствующей частоты.

Наибольший эффект излучения механической волны возникает при выполнении условия резонанса.

Приемник УЗ можно создать на основе пьезоэлектрического эффекта (*прямого пьезоэффекта*). В этом случае под действием УЗ-волны возникает деформация кристалла (рис.1, б), которая приводит при пьезоэффекте к генерации переменного электрического поля; соответствующее электрическое напряжение может быть измерено.

2. Воздействие УЗ на вещество

Ультразвук оказывает на вещество сложное действие: механическое, физико-химическое и тепловое.

Механическое действие УЗ на вещество связано с деформацией микроструктуры вещества, происходящей вследствие поочередного сближения и разрежения его частиц, вызываемых УЗ волной. При достаточной интенсивности УЗ это может вызвать разрушение вещества.

Важным свойством ультразвука является то, что он обуславливает интенсивное колебательное движение частиц жидкости (в каждой точке фазы уплотнения чередуются с фазами разрежения среды). Иногда в такой жидкости происходят разрывы сплошности среды (*кавитации*) и в фазе разрежения образуются микрополости, которые быстро заполняются насыщенным паром окружающей жидкости.

Время жизни полости (пузырька) очень мало, так как в волне вслед за разрежением быстро наступает сжатие и давление на пузырек со стороны окружающей жидкости резко возрастает (оно может превышать атмосферное давление в несколько тысяч раз), что приводит к схлопыванию полости и образованию сильных ударных волн. Это, в

частности, используется для разрушения оболочек растительных и животных клеток и извлечения из них биологически активных веществ.

Действием УЗ можно размельчить и диспергировать различные среды, что используется при изготовлении вакцин, эмульсий, аэрозолей и т.д.

В зависимости от условий воздействия и свойств среды, УЗ может способствовать и обратным процессам: осаждению суспензий, коагуляции аэрозолей, очистке газов от взвешенных в нем примесей.

УЗ ускоряет некоторые химические реакции, например, окисления и полимеризации.

На комплексном действии механических, тепловых и химических факторов основано *биологическое действие* ультразвука, который может вызвать гибель вирусов, бактерий и грибов, а при значительной мощности и мелких животных. При незначительной мощности УЗ повышает проницаемость клеточных мембран, активизирует процессы тканевого обмена.

3. Ультразвуковая эхолокация

Рассмотрим отражение УЗ-волны от границы раздела двух сред с различными свойствами (рис.2).

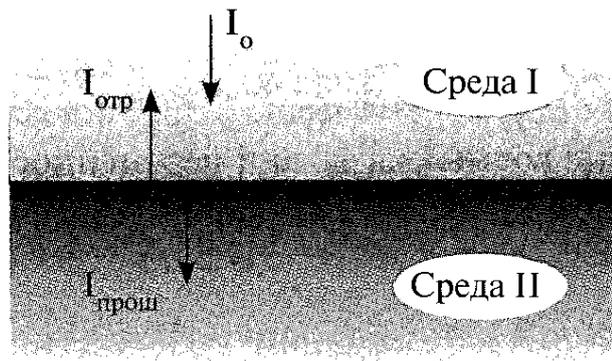


Рис.2

Для количественной характеристики процесса вводится понятие коэффициента отражения

$$R = \frac{I_{отр}}{I_0}, \quad (1)$$

где $I_{отр}$ - интенсивность отраженной УЗ-волны, I_0 - интенсивность падающей; $I_{прош}$ - интенсивность волны, прошедшей во вторую среду. R - это безразмерная величина, принимающая значения в интервале от нуля (отсутствие отражения) до единицы (полное отражение).

В случае нормального падения волны на границу раздела (рис.2), этот коэффициент можно найти по формуле:

$$R = \left(\frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \right)^2, \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 - плотности первой и второй среды соответственно; v_1 и v_2 - скорости УЗ в этих средах.

На явлении отражения УЗ от границы раздела сред основана *эхолокация* – метод локализации неоднородностей в средах (рис 3), где: а – устройство, являющееся одновременно и источником и приемником ультразвука. Стрелками показаны две волны: падающая на некоторый объект А и отраженная от этого объекта по направлению к приемнику; б – график зависимости регистрируемого приемником –источником электрического напряжения от времени: 1-импульс посылки, 2-отраженный импульс, Δt - интервал времени между ними.

Использование УЗ для этих целей обусловлено его *относительно малой длиной волны*, что дает возможность получить направленный отраженный сигнал от неоднородностей.

Источник УЗ посылает ультразвуковой сигнал в импульсном режиме. После нескольких импульсов наступает пауза, в течение которой источник «ожидает» прихода отраженной волны. На экране локатора фактически представлена временная зависимость электрического напряжения, соответствующего посланному и зарегистрированному после отражения УЗ-сигналу. Зная интервал времени Δt между импульсом посылки и отраженным импульсом (рис.3), а также скорость волны, можно найти расстояние от источника до границы отражения:

$$l = \frac{v\Delta t}{2}, \quad (3)$$

Одной из важнейших характеристик эхолотатора является его предел разрешения. Предел разрешения – это минимальное расстояние между двумя отражающими структурами, от которых можно зарегистрировать два отдельных отраженных сигнала.

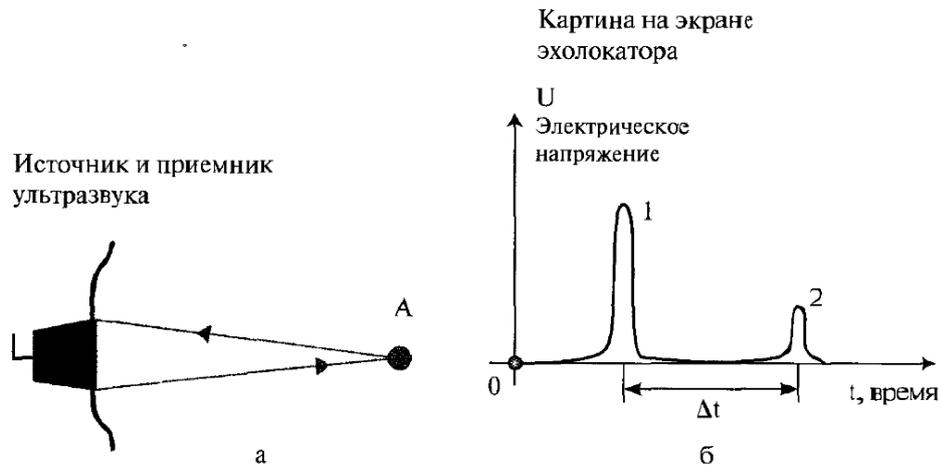


Рис.3

Предел разрешения Δl определяется соотношением:

$$\Delta l = \frac{n\lambda}{2}, \quad (3a)$$

где $\lambda=c/v$ –длина волны ультразвука, n - число периодов в посылке, c - скорость распространения УЗ сигнала в данной среде, v – частота УЗ колебаний, $n\lambda$ – длина посылки.

4. Доплерометрия

Способность ультразвуковых волн без существенного поглощения проникать в мягкие ткани организма и отражаться от уплотнений и неоднородностей используется в *диагностических* целях. *Ультразвуковая диагностика* дополняет основной метод исследования внутренних органов – рентгенодиагностику, а иногда имеет перед ней существенные преимущества. *Доплерометрия* – это дополнительный метод ультразвукового исследования, применяющийся для оценки характера и скорости кровотока в сосудах. С помощью цветной доплерометрии можно увидеть структуру и протяженность кровеносных сосудов, измерить скорость движения крови по сосудам, а также определить диаметр сосудов и выявить их закупорку. Доплерометрия – очень важный диагностический метод в выявлении заболеваний сосудистых систем внутренних органов, а также неоценимая высокоинформативная методика пренатальной диагностики. Доплерометрия позволяет определить точное расположение сосуда, направление и скорость кровотока в разные фазы сердечного цикла и, таким образом, оценить состояние кровотока в системе мать – плацента – плод и выявить ранние признаки нарушения плацентарной функции. Поскольку нарушение плацентарного кровообращения лежит в основе практически всех видов акушерской патологии, своевременная диагностика состояния кровотока позволяет прогнозировать риск осложнений в каждом конкретном случае.

Практически полное отсутствие каких-либо побочных эффектов позволяет проводить многократные ультразвуковые исследования любых частей тела, включая исследования плода при беременности.

В диагностике, основанной на эхо – методе, используются частоты $\sim 10^7$ Гц. Интенсивность ультразвука при этом не превышает $0,5 \text{ мВт/см}^2$, что считается безопасным для организма.

5. Эффект Доплера

В основе доплерометрии лежит эффект Доплера. Впервые это явление было открыто Х. Доплером в 1842 году.

Эффектом Доплера называют изменение частоты волн, воспринимаемых наблюдателем, вследствие относительного движения источника волн и наблюдателя.

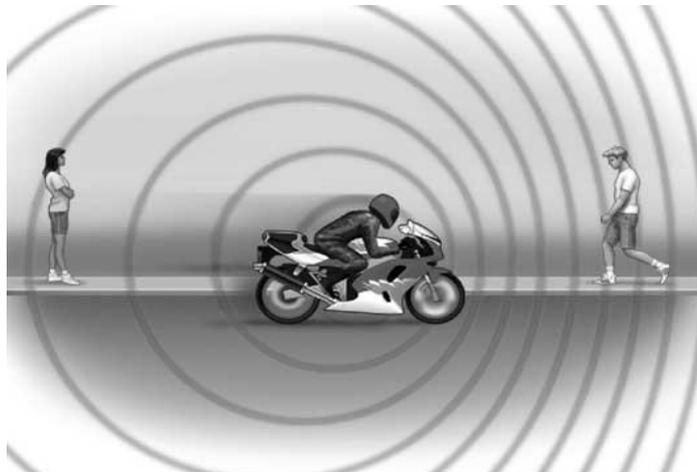


Рис.4. Доплеровский сдвиг частоты

При одновременном сближении источника волн и наблюдателя воспринимается частота (рис.4):

$$\nu_g = \frac{c + v_n}{c - v_u} \nu_u, \quad (4)$$

При одновременном удалении источника волн и наблюдателя воспринимается частота:

$$\nu_g = \frac{c - v_n}{c + v_u} \nu_u, \quad (5)$$

где c – скорость распространения УЗ волны, v_n – скорость наблюдателя, v_u – скорость источника, ν_u – частота излучения источника, ν_g – частота воспринимаемых волн.

Эффект Доплера используют для определения скорости кровотока.

Используется техническая система, содержащая генератор 1 электрических колебаний УЗ-частоты (рис.5), излучатель УЗ 2, устройство сравнения частот 3. УЗ-волна 4 проникает в кровеносный сосуд 5 и отражается от движущихся эритроцитов 6. Отраженная УЗ-волна 7 попадает в приемник 8, где преобразуется в электрическое колебание и усиливается.

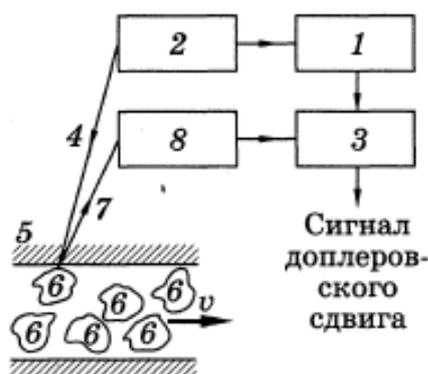


Рис.5

Если генератор излучает УЗ, который падает на эритроцит, то $v_z = v_u = 0$, $v_{np} = v_{sp} = v_0$, и используя формулу (4), имеем

$$\nu' = \frac{c + v_{np}}{c - v_{uct}} \nu_u = \frac{c + v_0}{c} \nu_z, \quad (6)$$

где ν' – частота волн, воспринимаемых приемником (в данном случае – эритроцитом).

Дальше рассмотрим УЗ волну, отраженную от эритроцита, который теперь станет источником УЗ: $v_{np} = 0$, $v_u = v_{sp} = v_0$, тогда

$$\nu'' = \frac{c}{c - v_0} \nu' = \frac{c}{c - v_0} \frac{c + v_0}{c} \nu_z = \frac{c + v_0}{c - v_0} \nu_z, \quad (7)$$

где ν'' – частота, воспринимаемая приемником.

Сдвиг частот равен:

$$\Delta v_D = v'' - v_z = \frac{c + v_0}{c - v_0} v_z - v_z = v_z \left(\frac{c + v_0}{c - v_0} - 1 \right) = v_z \left(\frac{c + v_0 - c + v_0}{c - v_0} \right) =$$

$$= v_z \frac{2v_0}{c - v_0},$$

Так как $c \gg v_0$, то

$$\Delta v_D = \frac{2v_0}{c} v_z, \quad (8)$$

а скорость кровотока равна

$$v_0 = \frac{c \Delta v_D}{2v_z}. \quad (9)$$

Δv_D называется *доплеровским сдвигом частоты*.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Физическую природу ультразвуковых волн.
2. Методы получения ультразвука.
3. Метод доплерометрии.
4. Метод ультразвуковой эхолокации.
5. Эффект Доплера.

Студент должен уметь:

1. Выводить формулу для определения скорости кровотока.
2. Объяснить метод получения УЗ с помощью явления обратного пьезоэффекта.
3. Объяснять метод ультразвуковой эхолокации.
4. Объяснять метод доплерометрии.
5. Решать ситуационные задачи.

4. Содержание обучения:

1. Границы ультразвуковых частот.
2. Ультразвук в природе.
3. Искусственные источники ультразвука.
4. Использование ультразвука в медицине.
5. Ультразвуковая эхолокация.
6. Эффект Доплера. Использование эффекта Доплера в медицине.
7. Решение ситуационных задач.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Что такое ультразвук? Чем обусловлены границы УЗ частот?
2. Какими специфическими особенностями обладает ультразвук?
3. Приведите примеры УЗ в природе.
4. Как получить ультразвук?
5. Что называют эффектом Доплера?
6. Запишите формулу для предела разрешения УЗ-эхолокатора.

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Объясните явления обратного пьезоэлектрического эффекта и магнитострикции.
2. Объясните суть эффекта Доплера для механических волн.
3. Как применяется эффект Доплера в медицине?
4. Как применяется ультразвук в диагностических и лечебных целях?
5. Опишите метод ультразвуковой эхолокации.
6. Выведите формулу для определения скорости кровотока.

7. Ситуационные задачи:

1. При определении скорости кровотока доплеровское смещение частоты составило $\Delta\nu/\nu = 0,06\%$. Определите скорость крови, если скорость ультразвука в ней $c = 1500$ м/с.
2. Эритроцит движется в потоке крови со скоростью $v = 300$ мм/с. На него падает и затем отражается УЗ-волна от неподвижного источника (зонда), работающего на частоте 5 МГц. Определите разность частот $\Delta\nu$ между отраженной эритроцитом и излучаемой источником ультразвуковыми волнами, если эритроцит удаляется от источника. Скорость распространения ультразвука в крови принять $c = 1500$ м/с.
3. Эритроцит движется в потоке крови со скоростью $v = 200$ мм/с. На него падает и затем отражается УЗ-волна от неподвижного источника (зонда), работающего на частоте 6 МГц. Определите разность частот $\Delta\nu$ между отраженной эритроцитом и излучаемой источником ультразвуковыми волнами, если эритроцит приближается к источнику. Скорость распространения ультразвука в крови принять $c = 1500$ м/с.
4. Подсчитайте максимальную скорость и ускорение частиц воздуха в УЗ-волне частотой 100 кГц, если амплитуда смещения частиц равна 0,5 мм.
5. Скорость УЗ-волны в кости черепа равна 3500 м/с, частота 3 МГц. Определите предел разрешения УЗ-эхологатора, если число периодов в посылке равно 9.
6. Определите минимальную частоту УЗ-волны в посылке из 8 периодов, если при исследовании кости требуется различить трещину 2 мм, $c = 3500$ м/с.
7. Определите минимальную частоту УЗ-волны в посылке из 10 периодов, если при исследовании кости требуется различить трещину шириной 2,5 мм. Скорость УЗ $c = 3500$ м/с.
8. Какую рабочую частоту следует выбрать для исследования отслоения сетчатки в глазе: 1 МГц или 20 МГц?
9. Можно ли проводить ультразвуковое исследование работы сердца, если датчик расположен на поверхности грудной клетки так, что между ним и сердцем находится легкое?

8. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Разбор темы – 15 мин.
3. Решение ситуационных задач – 45 мин.
4. Текущий контроль знаний – 20 мин.
5. Подведение итогов занятия – 5 мин.

9. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 5.10, 6.6, 9.5
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, § 7.5.
3. Физика и биофизика (под ред. Антонова В.Ф.). М., М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 4.1-4.5.
4. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 3.3.