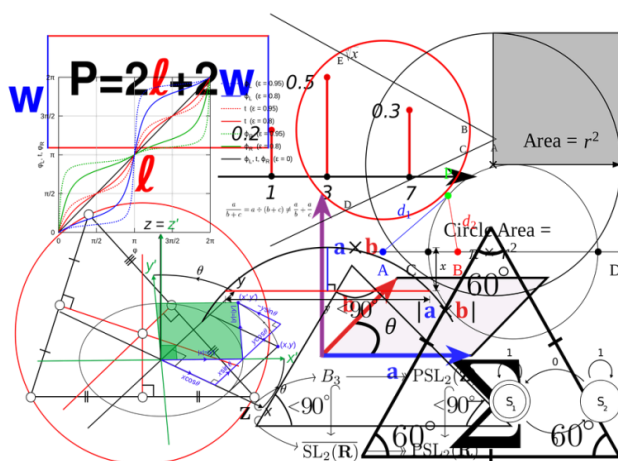


**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-ОСЕТИНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ»
Министерства здравоохранения Российской Федерации**

РУКОВОДСТВО

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

(ЧАСТЬ I)

**ВЛАДИКАВКАЗ – 2020**

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 31.05.03 Стоматология и содержит учебно-методические материалы к лабораторным занятиям по дисциплине «Физика, математика».

Для студентов стоматологического факультета

Рекомендовано к изданию ЦКУМС
ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России
«04» декабря 2020 г., протокол № 2.

СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПРОИЗВОДНАЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛ ФУНКЦИИ.....	6
НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ	15
ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ.	21
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ.....	32
ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ.....	38
ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ	54
АУДИОМЕТРИЯ.....	67
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ.....	76

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).

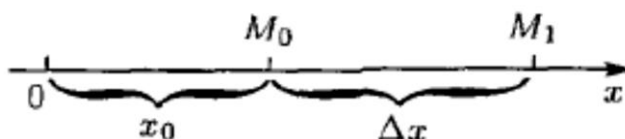


Рис. 1. Движение точки вдоль прямолинейной траектории.

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 .

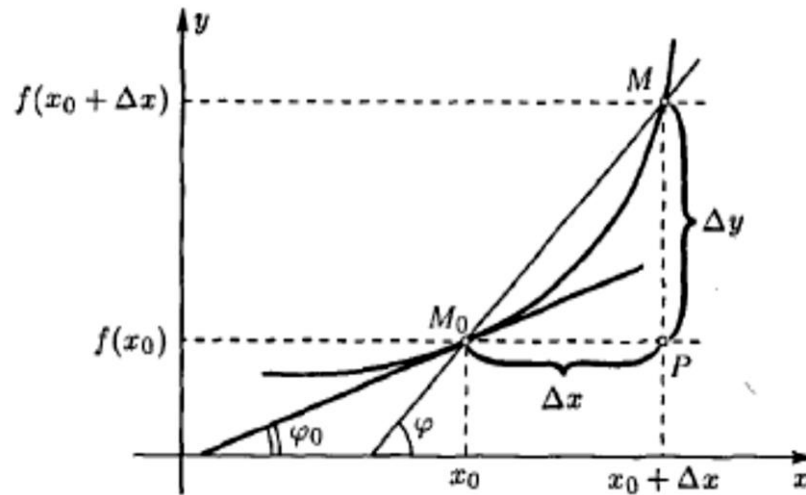


Рис. 2.

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.

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 произведением знаменателя на производную числителя и числителя на производную знаменателя, а знаменатель - квадрат знаменателя:

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

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.*

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

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 $a \neq 1$.
4a. $(e^x)' = e^x$.
5. $(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$, при $a > 0$ и $a \neq 1$.
5a. $(\ln x)' = \frac{1}{x}$.
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. $(\operatorname{arcctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}$.

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, $DC = dy$.

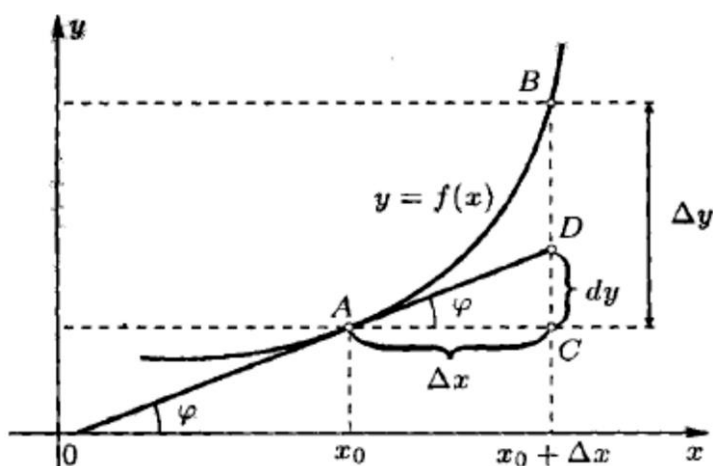


Рис. 3. Геометрический смысл дифференциала.

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:

$$1) y = \frac{2}{\sqrt{x}} + \frac{\sqrt{x}}{2};$$

$$7) y = \sqrt[3]{x^2} + \frac{1}{x} + 2;$$

$$2) y = \frac{x^3}{\sin^3 3x};$$

$$8) y = \arccos x;$$

$$3) y = e^{3x+1};$$

$$9) y = \sqrt{\sin 2x};$$

$$4) y = \ln \sin x + x^5;$$

$$10) y = e^{\cos x} \sin x;$$

$$5) y = (1 + 2x + 3x^2 + 4x^3)^5;$$

$$11) y = \frac{e^{2x}}{\cos 2x}.$$

$$6) y = e^2 + \cos 2x;$$

$$12) y = \sin x \cos x;$$

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 :

$$\begin{array}{lll} 1) y = 2x^3 - 4x; & x_1 = 1; & x_2 = 1,02; \\ 2) y = 3x^2 - 2x; & x_1 = 2; & x_2 = 2,001; \end{array}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$d(uv) = u dv + v du, \quad (4)$$

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 подинтегральной функции, подинтегрального 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:
 - а) метод разложения (метод непосредственного интегрирования);
 - б) метод замены переменной интегрирования (метод подстановки);
 - с) 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.

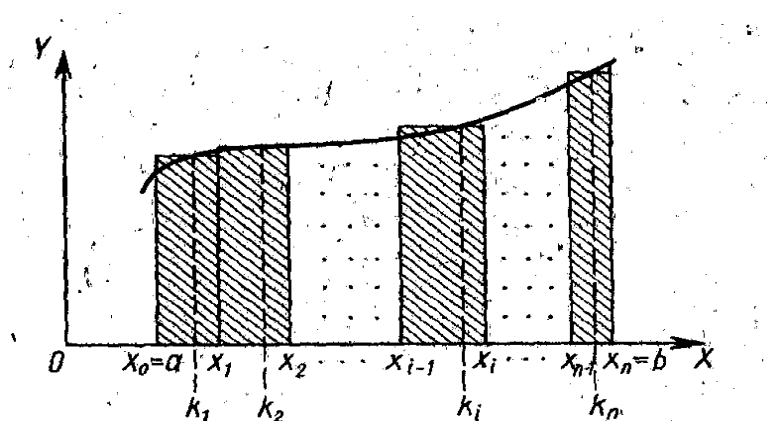


Рис.1

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

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

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)

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

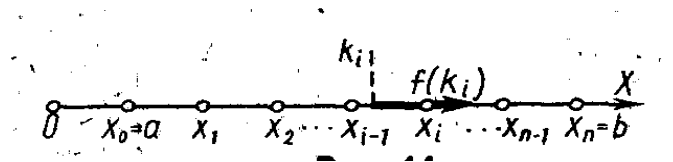


Рис.2

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):*

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

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

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

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

$u = u(x)$ 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 $y = x^2$.

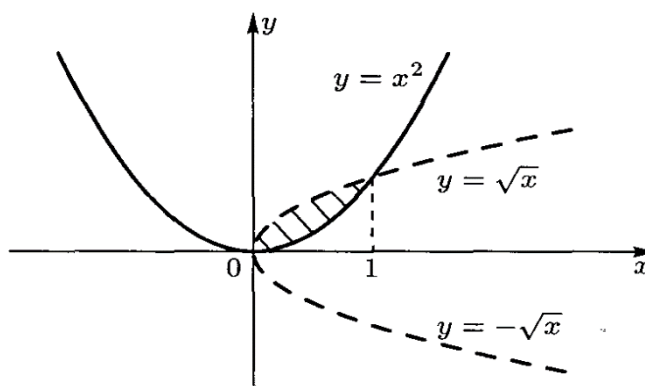


Рис.3

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:

- а) о вычислении площади криволинейной трапеции;
- б) 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:

- а) вычисление площадей плоских фигур;
- б) вычисление средних значений функций;
- с) 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

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

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

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

3. 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) $3xdx = 2ydy$;

9) $e^x y' = 1$;

$$4) x^2 dy - \frac{1}{2} y^2 dx = 0;$$

$$10) y' = 2x^2 + 1;$$

$$5) (1 + y) dy = (1 - x) dx;$$

$$11) xy' = 0,5;$$

$$6) (y + 1) dx = 2x dy;$$

$$12) 4x - 3y^2 y' = 0.$$

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

$$1) y' = \sqrt{x} \text{ при условии: } y(0) = 5;$$

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

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.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

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.

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. 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 случайные 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 – анальгина и 5 – цитромона. Наугад извлекается одна упаковка. Какова вероятность того, что ею окажется упаковка аспирина или анальгина?

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 анальгина (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 анальгина 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 анальгина. 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 несколько 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 .

5. Случайные величины

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.

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	...	x_n
P	p_1	p_2	...	p_n

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

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad (9)$$

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:

$$P_n(X) = \frac{n!}{X!(n-X)!} p^X q^{n-X}, \quad (10)$$

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:

$$P_n(X) \approx \frac{\mu^X}{X!} e^{-\mu}. \quad (11)$$

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:

$$M(X) = \mu = \sum_{i=1}^n x_i p_i = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n, \quad (12)$$

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:

$$D(X) = \sigma^2 = M((X - \mu)^2), \quad (13)$$

На практике дисперсию удобнее вычислить по формуле

$$D(X) = \sigma^2 = M(X^2) - \mu^2, \quad (14)$$

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:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}, \quad (15)$$

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 .

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:

$$F(x) = P(X < x), \quad (16)$$

Свойства функции распределения

1. *Функция распределения удовлетворяет неравенству:*

$$0 \leq F(x) \leq 1, \quad (17)$$

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):

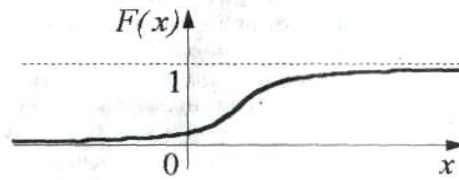


Рис.1

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:

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a), \quad (18)$$

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

$$P(X = a) = 0, \quad (19)$$

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:

$$f(x) = F'(x), \quad (20)$$

Свойства плотности распределения вероятностей:

1. Плотность вероятности является неотрицательной функцией:

$$f(x) \geq 0, \quad (21)$$

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

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx, \quad (22)$$

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

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1, \quad (23)$$

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

$$\int_{-\infty}^x f(x)dx = F(x), \quad (24)$$

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:

$$M(X) = \mu = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx, \quad (25)$$

Дисперсия непрерывной случайной величины:

$$D(X) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx, \quad (26)$$

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

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}, \quad (27)$$

6. 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

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (28)$$

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. График симметричен относительно вертикальной прямой $x_{max} = \mu$, причем точке $x_{max} = \mu$ функция имеет максимум, равный

$$y_{max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.$$

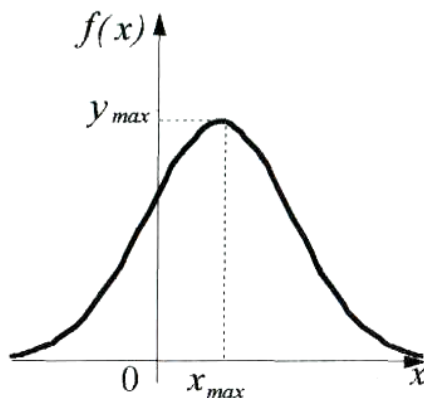


Рис.2

Подставив выражение (28) для плотности вероятности нормально распределенной случайной величины в (22), получим вероятность того, что в результате испытания нормально распределенная случайная величина примет значение из интервала (a,b) :

$$P(a < X < b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (29)$$

Введем в рассмотрение функцию

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

где $u = \frac{x-\mu}{\sigma}$.

Тогда формулу (29) можно преобразовать к виду, удобному для практического применения

$$P(a < X < b) = \Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right), \quad (30)$$

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

Пользуясь (30), 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. Понятие случайного события, виды случайных событий.
2. Определение вероятности случайного события.
3. Основные теоремы вероятностей.
4. Схему Бернулли.
5. Понятия дискретной и непрерывной случайных величин.
6. Способы задания случайной величины.
7. Основные числовые характеристики дискретной и непрерывной случайной величины.
8. Нормальный закон распределения. Правило трех сигм.

Студент должен уметь:

1. Применять основные теоремы вероятностей, формулы Бернулли и Пуассона.
2. Составлять закон распределения дискретной случайной величины.
3. Вычислять основные числовые характеристики случайной величины.
4. Находить вероятность попадания в заданный интервал значения непрерывной случайной величины, заданной функцией распределения.
5. Находить вероятность попадания значения нормально распределенной случайной величины в заданный интервал.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Виды случайных событий.
2. Классическое и статистическое определения вероятности случайного события.
3. Теоремы сложения и умножения вероятностей случайных событий.
4. Независимые повторные испытания (схема Бернулли). Формула Бернулли. Формула Пуассона.
5. Понятие дискретной случайной величины. Основные числовые характеристики дискретной случайной величины и их свойства.
6. Понятие непрерывной случайной величины. Способы задания непрерывной случайной величины.

7. Функция распределения случайной непрерывной величины, ее свойства, график.
8. Плотность распределения вероятностей непрерывной случайной величины, ее основные свойства.
9. Основные числовые характеристики непрерывной случайной величины.
10. Нормальный закон распределения. Кривая Гаусса.
11. Вероятность попадания значения нормально распределенной величины в заданный интервал. Правило трех сигм.

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. На клумбе растут 20 красных, 30 синих и 40 белых астр. Какова вероятность сорвать в темноте цветную астру, если срывают одну астру?
8. Шесть человек больны заболеванием, для которого коэффициент выздоровления составляет 98%. Какова вероятность того, что:
 - а) выздоровеют все шестеро;
 - б) выздоровеют только пятеро?
9. 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».
10. 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.
11. Среди семян ржи 0,4 % семян сорняков. Какова вероятность при случайном отборе 5000 семян обнаружить 5 семян сорняков?

12. 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.

13. 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, 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.

14. 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.

15. 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.

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

17. Найти вероятность попадания в интервал (1,3) значения непрерывной случайной величины, заданной функцией распределения:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 1, \\ \frac{x^2 + 1}{20}, & \text{если } 1 < x \leq 4, \\ 1, & \text{если } x > 4 \end{cases}$$

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

19. 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. 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 и статистическое определения вероятности случайного события.
5. Что называется схемой Бернулли? Приведите формулы Бернулли и Пуассона.
6. Дайте определение случайной величины.
7. Дайте определение дискретной случайной величины. Приведите примеры.
8. Запишите формулы основных числовых характеристик дискретной случайной величины.
9. Дайте определение непрерывной случайной величины.
10. Что называется плотностью вероятностей непрерывной случайной величины? Как она связана с функцией распределения?
11. Запишите формулы для основных числовых характеристик непрерывной случайной величины.
12. Запишите формулу нормального распределения.

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»?
4. Приведите свойства основных числовых характеристик дискретной случайной величины.
5. В чем состоит удобство среднего квадратического отклонения?
6. Почему непрерывную случайную величину невозможно задать в виде таблицы ее закона распределения и с помощью формулы?
7. Приведите свойства функции распределения и плотности вероятности непрерывной случайной величины.
8. Приведите и охарактеризуйте кривую Гаусса.
9. 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., §§ 8.1., 8.2.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 7.1., 7.2.
3. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика, М., «Дрофа», 2008, §§ 2.1.-2.3.

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Математическая статистика – раздел математики, посвященный математическим методам систематизации, обработки и использования статистических данных. При этом статистическими 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.

Работник здравоохранения должен уметь интерпретировать результаты лабораторных тестов, клинические измерения и наблюдения с учетом случайных колебаний значений физиологических параметров, возможности ошибки наблюдения и разброса показаний приборов. Знание статистических методов и умение их применять необходимо не только для понимания медико-биологических научных дисциплин, но и также для эффективной работы в любой из областей здравоохранения. Такое знание необходимо для понимания и интерпретации биологических, клинических и лабораторных данных.

2. Теория:

1. Генеральная и выборочная статистические совокупности

Множество объектов, характеризуемых 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*.

Генеральную совокупность образует, например, множество студентов первого курса вузов страны. Однако, если нас интересует распределение такого признака, как, например, рост студентов, то практически невозможно провести измерение роста всех студентов и обработать эти результаты. Реальным является отбор ограниченного числа студентов, измерение их роста и обработка полученных результатов.

Статистическая совокупность, состоящая из некоторого количества объектов, случайным образом отобранных из соответствующей генеральной совокупности, называется *выборочной статистической совокупностью (выборкой)*.

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:

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

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 .

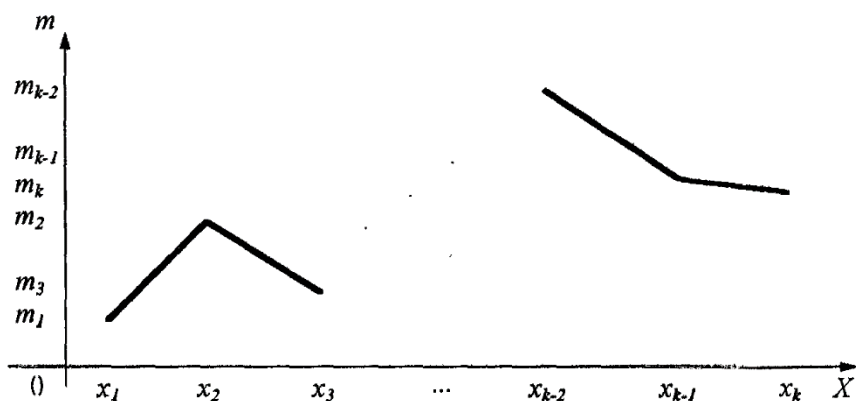


Рис.1. Полигон частот.

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. 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):

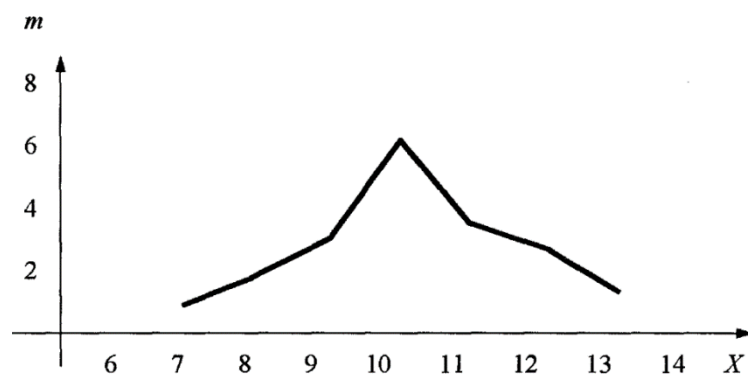


Рис.2

3. Статистический интервальный ряд распределения

Использование дискретного ряда распределения на практике удобно лишь в случае ограниченного (не более 10-20) количества различающихся между собой вариантов в выборке. Если же количество таких вариантов 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):

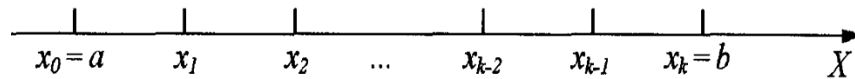


Рис.3

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):

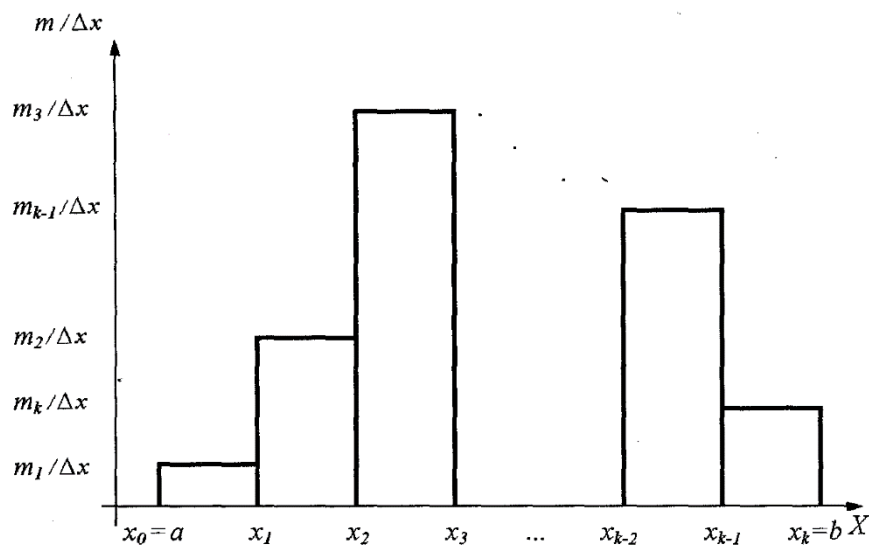


Рис.4. Гистограмма частот.

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 (см. 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 .

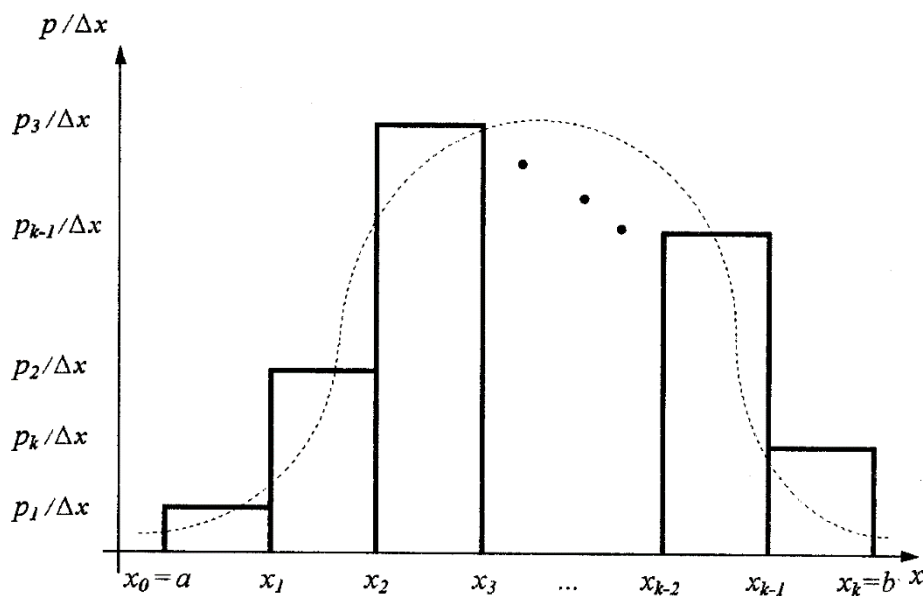


Рис.5. Гистограмма относительных частот.

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.

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

4. 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:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3)$$

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*:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i x_i, \quad (4)$$

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

$$\bar{X} \approx \bar{x}, \quad (5)$$

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

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2, \quad (6)$$

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

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k m_i (x_i - \bar{x})^2, \quad (7)$$

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

$$\sigma^2 \approx s^2, \quad (8)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \quad (9)$$

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

$$s = \sqrt{s^2}, \quad (10)$$

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

$$\sigma \approx s, \quad (11)$$

Пример 2. 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 (4) 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 (7) 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 (8) получим точечную оценку генеральной дисперсии σ^2 :

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

Далее, по формуле (10) найдем исправленное выборочное среднее квадратическое отклонение s :

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

и в соответствии с (11) получим:

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

5. 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

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{X}}{s_x^-}, \quad (12)$$

где

$$s_x^- = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (13)$$

- *исправленное среднее квадратическое отклонение средней выборочной*.

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

$$\Delta x = t_\gamma(f) \cdot s_x^-, \quad (14)$$

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

$$(\bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x), \quad (15)$$

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

Пример 3. 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 2 значением исправленного выборочного среднего квадратического отклонения $s \approx 1,5$, по формуле (13) 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: $\gamma_{0,95}(19) \approx 2,093$. По формуле (15) 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. Определения генеральной и выборочной статистической совокупностей.
2. Понятие о статистическом дискретном ряде распределения.
3. Понятие о статистическом интервальном ряде распределения.
4. Основные числовые характеристики выборочной статистической совокупности.
5. Точечные и интервальные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности.
6. Распределение Стьюдента.

Студент должен уметь:

1. Строить полигоны частот и относительных частот.
2. Строить гистограммы частот и относительных частот.
3. Находить точечные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности.
4. Находить интервальные оценки числовых характеристик генеральной совокупности.

4. Содержание обучения:

Теоретическая часть:

1. Определения генеральной и выборочной статистической совокупностей. Объем выборки.
2. Статистический дискретный ряд распределения.
3. Полигоны частот и относительных частот.
4. Статистический интервальный ряд распределения.
5. Гистограммы частот и относительных частот.
6. Точечные оценки основных числовых характеристик генеральной совокупности.
7. Интервальные оценки числовых характеристик генеральной совокупности.

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.): 151, 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.Из генеральной совокупности извлечена выборка объемом $n = 50$:

X	2	5	7	10
m	16	12	8	14

Дать точечную оценку генеральной средней.

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

X	1250	1275	1280	1300
m	20	25	50	5

7.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

8. 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.

9. 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.

10. 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: $C_{норм} = 130 \pm 10$ (г/л).

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. Какая оценка характеристики распределения называется точечной?
7. Запишите формулы для генеральной средней, выборочной средней, генеральной дисперсии, исправленной выборочной дисперсии, генерального среднего квадратического отклонения, исправленного выборочного среднего квадратического отклонения.
8. Что называется интервальной оценкой числовой характеристики?
9. Дайте определения доверительного интервала и доверительной вероятности.

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?
5. Чем определяется ценность выборочных характеристик распределения?
6. Запишите формулу распределения Стьюдента для случайной величины.
7. Что называется исправленным средним квадратическим отклонением средней выборочной?
8. 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, §§ 9.1.-9.3.
2. Павлушков И.В. и др. Основы высшей математики и математической статистики. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§8.1., 8.2.
3. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 3.1., 3.2
4. Антонов В.Ф. и др. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§1.1, 1.2.

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*. *Тон*ом называется звук, являющийся 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).

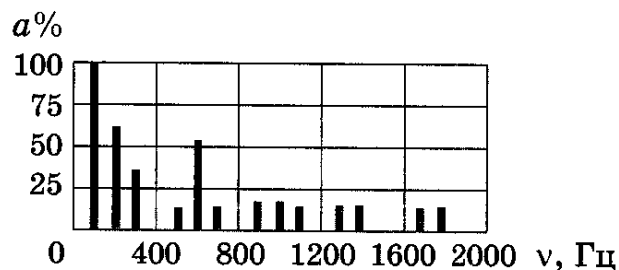


Рис.1

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).

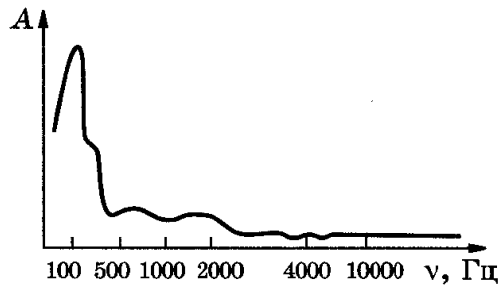


Рис.2

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.

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 $\text{Вт}/\text{м}^2$ при 6 кГц до 10 $\text{Вт}/\text{м}^2$ 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 :

$$L_{\text{Б}} = \lg \frac{I}{I_0}, \quad (2)$$

или при использовании децибел

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

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.

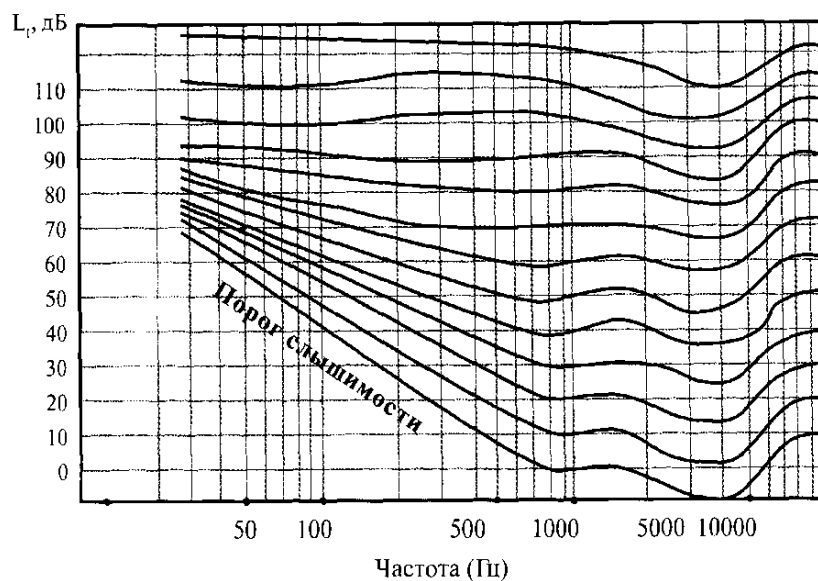


Рис.3

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 звукопроводению 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 звукопроводению.
- 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 термопринтер.

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
--------------	--------

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.

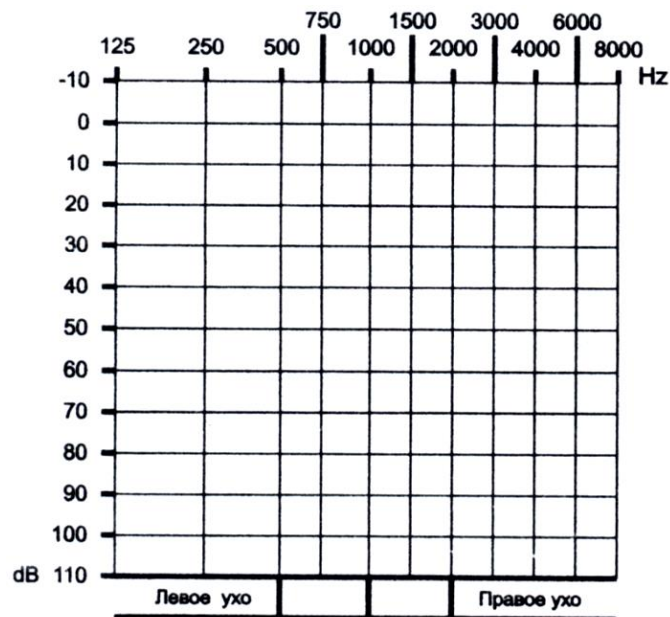


Рис.5

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.

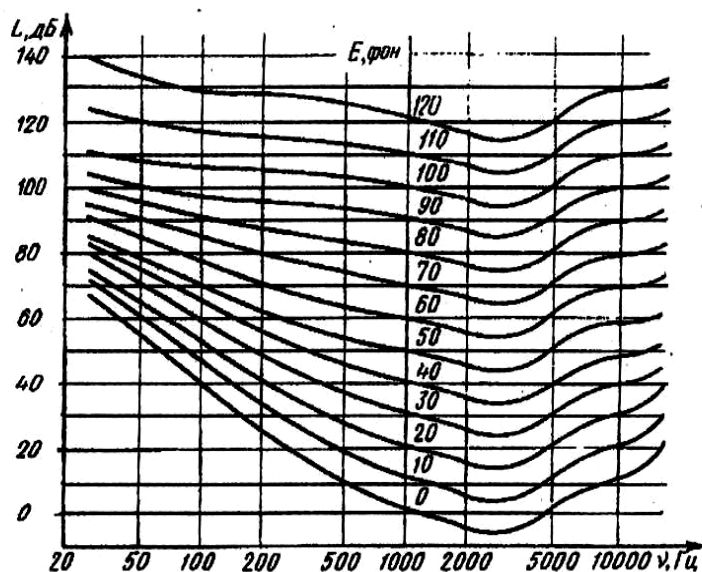


Рис.6

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., Коржув А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 3.2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

1. Научно-методическое обоснование:

Жидкие среды составляют наибольшую часть организма, их перемещение обеспечивает обмен веществ и снабжение клеток кислородом, поэтому механические свойства и течение жидкостей представляют собой интерес для медиков.

При движении жидкости, в том числе крови по кровеносным сосудам, большую роль играет внутреннее трение или вязкость.

2. Теория:

В реальной жидкости между молекулами действуют силы взаимного притяжения, обуславливающие *внутреннее трение (вязкость)*. Внутреннее трение, например, вызывает силу сопротивления при помешивании жидкости, замедление скорости падения брошенных в жидкость тел и т.д.

Ньютон установил, что сила F_{mp} внутреннего трения между двумя слоями жидкости, движущимися с различными скоростями (рис.1), зависит от природы жидкости и прямо пропорциональна площади S соприкасающихся слоев и градиенту скорости $\frac{dv}{dz}$ между ними:

$$F_{mp} = \eta S \frac{dv}{dz}, \quad (1)$$

где η - коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом вязкости* или просто *вязкостью* жидкости и зависящий от ее природы.

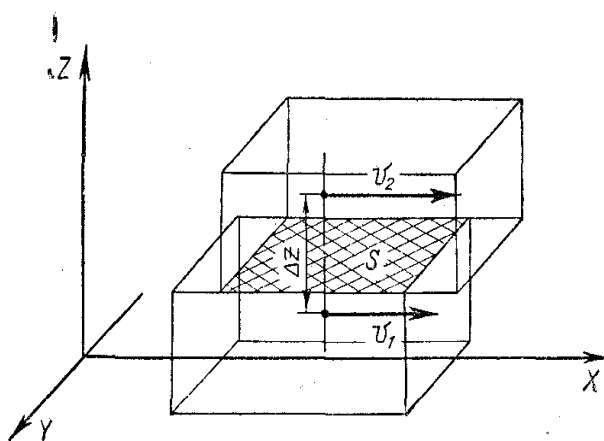


Рис.1

Сила F_{mp} действует *касательно* к поверхности соприкасающихся слоев жидкости, ускоряет слой, движущийся более медленно и замедляет слой, движущийся более быстро.

Градиент скорости характеризует быстроту изменения скорости между слоями жидкости, т.е. в направлении, перпендикулярном направлению течения жидкости.

Единица коэффициента вязкости в системе СИ – $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$, в СГС – $\text{дин} \cdot \text{с} / \text{см}^2$, эта единица называется *пуазом* (П):

$$1\text{П} = 0,1 \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2.$$

У большинства жидкостей (вода, низкомолекулярные соединения, истинные растворы, расплавленные металлы и их соли) коэффициент вязкости зависит только от природы жидкости и температуры: с повышением температуры коэффициент вязкости уменьшается. Такие жидкости подчиняются уравнению (1) и называются *ньютоновскими*, а их вязкость называется *нормальной*.

На практике используется величина $\eta_{\text{отн}}$ – *относительная вязкость*, под которой понимают отношение коэффициента вязкости данной жидкости к коэффициенту вязкости воды при той же температуре:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{\eta}{\eta_0} 100\%, \quad (2)$$

У высокомолекулярных жидкостей (например, растворы полимеров) или представляющих дисперсные системы (суспензии и эмульсии) коэффициент вязкости зависит также от режима течения – давления и градиента скорости. Такие жидкости не подчиняются уравнению (1), называются *неньютоновскими*, а их вязкость называется *аномальной*. К неньютоновским жидкостям относится, например, кровь.

При относительно невысокой скорости течения по трубам небольшого диаметра движение жидкости имеет *ламинарный* характер: слой молекул прилегающих к стенке трубы прилипает к ней и остается неподвижным, следующий слой под действием силы давления и при противодействии силы внутреннего трения между слоями смещается относительно пристеночного слоя и движется с небольшой скоростью. Каждый последующий слой молекул, смещаясь относительно предыдущего слоя, движется по отношению к стенке трубы с постоянно возрастающей скоростью, которая достигает наибольшего значения в центре трубы (рис.2):

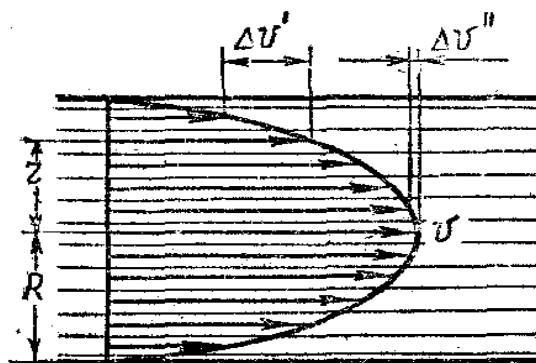


Рис.2

Распределение скоростей по сечению круглой трубы имеет параболический характер (рис.2):

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

где p_1 и p_2 - давления в начале и конце участка трубы длиной l , η - коэффициент вязкости жидкости, R - радиус трубы, r - радиус рассматриваемого слоя жидкости. Максимальная скорость наблюдается в центре трубы:

$$v_{\max} = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta} R^2, \quad (4)$$

Ламинарное течение устанавливается в трубах с гладкими стенками, без резких изменений площади сечения или изгибов трубы, при отсутствии множественных разветвлений.

При нарушении этих условий, и особенно при высоких скоростях течение переходит в *турбулентное*.

Характерным для турбулентного течения являются местные изменения давления в жидкости, сопровождающиеся звуковыми явлениями (шум, журчание).

Скорость $v_{кр}$ перехода ламинарного течения в турбулентное определяется *числом Рейнольдса* Re :

$$Re = \frac{v_{кр} \rho D}{\eta}, \quad (5)$$

где ρ - плотность жидкости, D - диаметр трубы.

Для прямой гладкой трубы $Re_{кр} = 2300$. Если $Re \geq Re_{кр}$, то течение переходит в турбулентное.

Средняя скорость ламинарного течения по неширокой горизонтальной трубе постоянного сечения равна (*закон Пуазейля*):

$$v_{cp} = \frac{p_1 - p_2}{8l\eta} R^2, \quad (6)$$

где p_1 и p_2 - давления на входе и выходе из трубы, R - радиус трубы, l - длина трубы, η - коэффициент вязкости жидкости.

Количество жидкости Q , протекающее через поперечное сечение в единицу времени равно $Q = v_{cp} S$, где $S = \pi R^2$. Следовательно

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)}{l} \frac{\pi R^4}{8\eta}, \quad (7)$$

Формулу (7) называют *формулой Гагена-Пуазейля*. Ее можно записать в виде:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{X}, \quad (8)$$

где $X = \frac{8l\eta}{\pi R^4}$ называется гидравлическим сопротивлением.

Для измерения относительного коэффициента вязкости не очень вязких жидкостей используется капиллярный вискозиметр.

Для более вязких жидкостей применяется метод, основанный на измерении скорости падения в жидкости небольших тел сферической формы (*метод Стокса*).

Стокс эмпирически установил, что при не слишком быстром движении тела сферической формы (шарика) сила сопротивления движению равна

$$F_c = 6\pi r\eta v, \quad (9)$$

где r – радиус шарика, v – скорость движения, η – коэффициент вязкости жидкости.

При падении шарика в узком цилиндре, наполненном исследуемой жидкостью на шарик действуют три силы (рис.3): сила сопротивления $F_c = 6\pi r\eta v$, сила тяжести $P = (4/3)\pi r^3 \rho_{\text{ш}} g$, выталкивающая сила $F_B = (4/3)\pi r^3 \rho_{\text{ж}} g$, где $\rho_{\text{ш}}$ – плотность вещества шарика, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

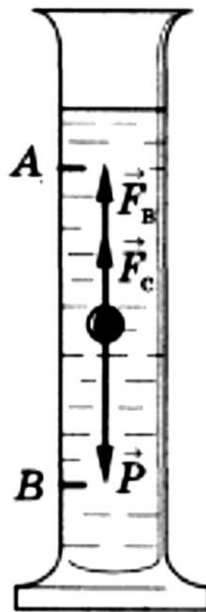


Рис.3

При равномерном движении шарика

$$P = F_B + F_c.$$

Отсюда

$$F_c = P - F_B$$

или

$$6\pi r\eta v = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})g,$$

и для коэффициента вязкости получаем:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{v}, \quad (10)$$

Измерив время, за которое шарик проходит определенное расстояние l , можно вычислить скорость его движения:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Тогда конечная формула для определения коэффициента вязкости примет вид:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{l}t, \quad (11)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для определения коэффициента вязкости жидкости используется высокий цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью (рис.3). На сосуде имеются две кольцевые метки A и B . Метка A соответствует высоте, на которой силы, действующие на шарик, уравниваются и движение становится равномерным. Нижняя метка B нанесена для удобства отсчета времени.

$\rho_{\text{ш}} = 11,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность вещества шарика (свинец),

$\rho_{\text{ж}} = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность исследуемой жидкости,

$r = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – радиус шарика.

Задание. Определение вязкости жидкости

1. Опустите шарик в сосуд с жидкостью так, чтобы он двигался по оси цилиндра.
2. Измерьте время t прохождения шариком расстояния между метками A и B .
3. Измерьте расстояние l между метками.
4. Произведите аналогичные измерения с пятью шариками.
5. Данные измерений занесите в табл.1 и произведите вычисления.
6. Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерений.

Таблица 1.

№	$l, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\Delta\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\frac{\overline{\Delta\eta}}{\overline{\eta}} \cdot 100\%$
1.					
2.					
3.					

 $\overline{\eta} =$ $\overline{\Delta\eta} =$ **3. Цель деятельности студентов на занятии:****Студент должен знать:**

1. Физическую природу вязкости жидкости.
2. Единицы измерения вязкости.
3. Формулу Ньютона.
4. Понятия ламинарного и турбулентного течений.
5. Формулу Гагена-Пуазейля.
6. Метод Стокса.

Студент должен уметь:

Определять вязкость жидкости по методу Стокса.

4. Содержание обучения:

1. Вязкость жидкости. Формула Ньютона. Градиент скорости.
2. Коэффициент внутреннего трения. Единицы вязкости. Относительная вязкость.
3. Течение жидкости по трубам. Ламинарное течение. Формула для скорости слоя. Распределение скорости слоев по сечению трубы.
4. Турбулентное течение. Число Рейнольдса.
5. Формула Гагена-Пуазейля. Гидравлическое сопротивление.
6. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Что называется внутренним трением?
2. Запишите уравнение Ньютона.
3. Что такое градиент скорости?
4. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
5. Что называют относительным коэффициентом вязкости?
6. Какие жидкости называются ньютоновскими? неньютоновскими?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Охарактеризуйте ламинарное и турбулентное течения жидкости.
2. Что называют числом Рейнольдса, от каких величин оно зависит?

- 3.Получите формулу Гагена-Пуазейля.
- 4.Выведите формулу для определения вязкости жидкости по методу Стокса.
- 5.Какие условия должны выполняться при измерении вязкости методом Стокса?

7. Самостоятельная работа студентов:

По учебнику Ремизова и др. (§7.4) изучите клинический метод определения вязкости крови.

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, §§ 7.1-7.5
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §§ 8.3-8.6.
- 3.Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 2.1.