

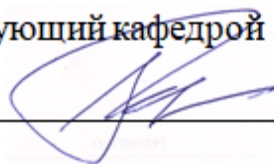
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт прикладной математики и компьютерных наук
Кафедра вычислительной механики и математики

Утверждено на заседании кафедры
«Вычислительная механика и математика»
« 14 » января 2021 г., протокол № 5

с учетом изменений и дополнений,
утвержденных на заседании кафедры
«Вычислительная механика и математика»
«17» июня 2021г., протокол №10,
вступающих в силу с 1 сентября 2021 года

Заведующий кафедрой



В.В. Глаголев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских) занятий
по дисциплине (модулю)
«Математика»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
07.03.01 Архитектура

с направленностью (профилем)
Архитектура

Форма обучения: очно-заочная
Идентификационный номер образовательной программы: 070301-01-21

Тула 2021 год

Разработчик(и) методических указаний

Боницкая О.В., доцент, к.ф.м.н.

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

Задача 1.

Теоретические сведения.

В прямоугольной декартовой системе координат $Oxyz$ положение любой точки задается тремя числами – *координатами* : $A(x_A, y_A, z_A)$ (рисунок 1).

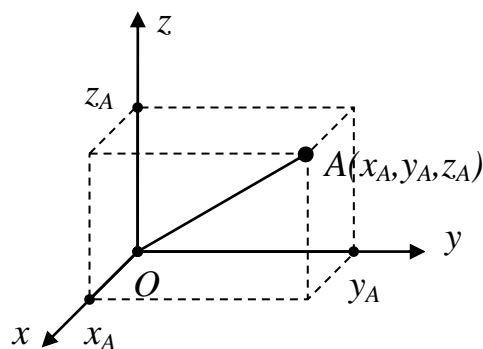


Рисунок 1.

Расстояние между двумя точками $A_1(x_1, y_1, z_1)$ и $A_2(x_2, y_2, z_2)$ определяется по формуле

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (1)$$

При решении задач аналитической геометрии на плоскости необходимы следующие сведения о прямой линии:

1) если точка $M(x; y)$ делит отрезок M_1M_2 ($M_1(x_1; y_1)$ и $M_2(x_2; y_2)$) в отношении λ , то координаты этой точки выражаются формулами

$$x = \frac{x_1 + \lambda x_2}{1 + \lambda}, \quad y = \frac{y_1 + \lambda y_2}{1 + \lambda}, \quad (2)$$

если же точка $M(x; y)$ - середина отрезка M_1M_2 , то

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y = \frac{y_1 + y_2}{2}; \quad (3)$$

2) уравнение прямой, проходящей через точку $M_1(x_1; y_1)$ и имеющей данный угловой коэффициент k , записывается в виде

$$y - y_1 = k(x - x_1); \quad (4)$$

3) уравнение прямой, проходящей через две данные точки $M_1(x_1; y_1)$ и $M_2(x_2; y_2)$, имеет вид

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \text{ при этом } k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}; \quad (5)$$

4) острый угол между двумя прямыми с угловыми коэффициентами k_1 и k_2 определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 k_2} \right|, \quad (6)$$

при этом условие параллельности прямых имеет вид $k_1 = k_2$, а условие

перпендикулярности $k_1 = -\frac{1}{k_2}; \quad (7)$

5) если прямая на плоскости задана *общим уравнением* $Ax + By + C = 0$, то $k_1 = -\frac{A}{B}$

- ее угловой коэффициент;

6) если в общем уравнении прямой поделить все члены на $C \neq 0$, получим уравнение прямой в отрезках:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1, \quad \text{где } a = -\frac{C}{A}, \quad b = -\frac{C}{B}; \quad (8)$$

7) точка пересечения двух прямых $A_1x + B_1y + C_1 = 0$ и $A_2x + B_2y + C_2 = 0$ определяется из решения системы уравнений

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2 = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Уравнение окружности с центром в точке $E(a, b)$ и радиусом R имеет вид

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2.$$

(10)

Пример выполнения задания.

Даны вершины треугольника ABC : $A(-4; 8)$, $B(5; -4)$, $C(10; 6)$.

Найти: 1) длину стороны AB ; 2) уравнения сторон AB и AC в общем виде и их угловые коэффициенты; 3) внутренний угол A в радианах с точностью

до 0,01; 4) уравнение высоты CD в общем виде и ее длину; 5) уравнение окружности, для которой высота CD есть диаметр.

Решение:

1) Расстояние d между двумя точками на плоскости определяется по формуле (1), в которую подставлены значения координат точек A и B (положим $z_1 = z_2 = 0$), тогда

$$AB = \sqrt{(5 - (-4))^2 + (-4 - 8)^2} = \sqrt{81 + 144} = 15.$$

2) Уравнение прямой, проходящей через две заданные точки имеет вид (5):

Подставив в (5) координаты точек A и B , получим уравнение прямой AB :

$$\frac{x - (-4)}{5 - (-4)} = \frac{y - 8}{-4 - 8}, \quad \frac{x + 4}{9} = \frac{y - 8}{-12}, \quad \frac{x + 4}{3} = \frac{y - 8}{-4},$$

$$3y - 24 = -4x - 16, \quad \text{или} \quad 4x + 3y - 8 = 0 \quad (AB).$$

Для нахождения углового коэффициента k_{AB} прямой AB разрешим полученное уравнение относительно y : $y = -\frac{4}{3}x + \frac{8}{3}$. Отсюда $k_{AB} = -\frac{4}{3}$. Подставив в формулу

(5) координаты точек A и C , найдем уравнение прямой AC : $\frac{x - (-4)}{10 - (-4)} = \frac{y - 8}{6 - 8},$

$$\frac{x + 4}{14} = \frac{y - 8}{-2}, \quad \frac{x + 4}{7} = \frac{y - 8}{-1},$$

$$7y - 56 = -x - 4 \quad \text{или} \quad x + 7y - 52 = 0 \quad (AC).$$

Отсюда $k_{AC} = -\frac{1}{7}$.

3) Угол между двумя прямыми, угловые коэффициенты которых равны k_1 и k_2 , определяется по формуле (6). Угол A , образованный прямыми AB и AC , найдем по

формуле (6), подставив в нее $k_1 = k_{AB} = -\frac{4}{3}, \quad k_2 = k_{AC} = -\frac{1}{7}.$

$$\operatorname{tg} A = \frac{-\frac{1}{7} - \left(-\frac{4}{3}\right)}{1 + \left(-\frac{1}{7}\right) \cdot \left(-\frac{4}{3}\right)} = \frac{\frac{4}{3} - \frac{1}{7}}{1 + \frac{4}{21}} = \frac{\frac{25}{21}}{\frac{25}{21}} = 1,$$

$$\angle A = \operatorname{arctg} 1 = 45^\circ \approx 0,79 \text{ рад.}$$

4) Так как высота CD перпендикулярна стороне AB , то угловые коэффициенты этих прямых связаны соотношением (7), поэтому

$$k_{CD} = -\frac{1}{k_{AB}} = -\frac{1}{-\frac{4}{3}} = \frac{3}{4}.$$

Уравнение прямой, проходящей через заданную точку в заданном угловым коэффициентом k направлении, имеет вид (4). Подставив в (4) координаты точки

C и $k_{CD} = \frac{3}{4}$, получим уравнение высоты CD :

$$y - 6 = \frac{3}{4}(x - 10), \quad 4y - 24 = 3x - 30, \quad 3x - 4y - 6 = 0 \quad (CD).$$

Для нахождения длины CD определим координаты точки D , решив систему уравнений (AB) и (CD) :

$$\begin{cases} 4x + 3y - 8 = 0 \\ 3x - 4y - 6 = 0 \end{cases}, \quad \text{откуда } x = 2, y = 0, \quad \text{то есть } D(2; 0).$$

Подставив в формулу (1) координаты точек C и D , находим:

$$CD = \sqrt{(10 - 2)^2 + (6 - 0)^2} = \sqrt{64 + 36} = 10.$$

5) Так как CD является диаметром искомой окружности, то ее центр E есть середина отрезка CD . Воспользовавшись формулой (3) деления отрезка пополам, получим:

$$x_E = \frac{x_C + x_D}{2} = \frac{10 + 2}{2} = 6, \quad y_E = \frac{y_C + y_D}{2} = \frac{6 + 0}{2} = 3.$$

Следовательно, $E(6; 3)$ и $R = \frac{CD}{2} = \frac{10}{2} = 5$. Используя формулу (10), получаем

уравнение искомой окружности: $(x - 6)^2 + (y - 3)^2 = 25$.

Задача 2.

Теоретические сведения.

Если известны начало вектора $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и конец $M_2(x_2, y_2, z_2)$, то координаты вектора $\vec{a} = \overrightarrow{M_1 M_2}$ находятся по формулам

$$x = x_2 - x_1, \quad y = y_2 - y_1, \quad z = z_2 - z_1, \quad (11)$$

а его длина определяется выражением

$$|\vec{a}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (12)$$

Вектор \vec{a} с координатами (x, y, z) может быть представлен разложением по ортам в виде

$$\vec{a} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (13)$$

Если α, β, γ – углы, которые вектор \vec{a} образует с положительными направлениями осей координат, то $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ называются *направляющими косинусами* вектора \vec{a} (рисунок 2). Тогда имеют место соотношения

$$x = |\vec{a}| \cdot \cos\alpha, \quad y = |\vec{a}| \cdot \cos\beta, \quad z = |\vec{a}| \cdot \cos\gamma, \quad \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1.$$

Для векторов $\vec{a} = (x_1, y_1, z_1)$ и $\vec{b} = (x_2, y_2, z_2)$ вводятся операции сложения и умножения на число такие, что

$$\vec{a} \pm \vec{b} = (x_1 \pm x_2, y_1 \pm y_2, z_1 \pm z_2) \quad \text{и} \quad \lambda\vec{a} = (\lambda x_1, \lambda y_1, \lambda z_1),$$

где λ – любое число.

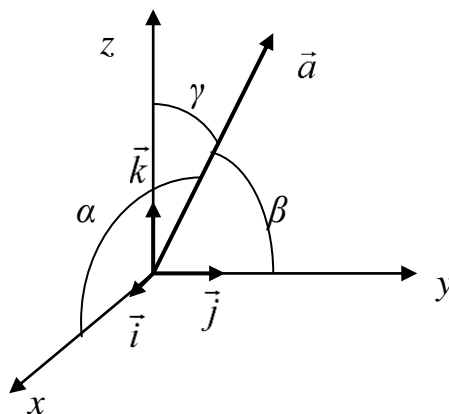


Рисунок 2.

Скалярным произведением двух векторов \vec{a} и \vec{b} ($\vec{a} \cdot \vec{b}$) называется число, равное произведению длин этих векторов на косинус угла φ между ними, $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \varphi$ или, если векторы заданы своими координатами, то

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2. \quad (14)$$

Векторы, лежащие на одной или параллельных прямых, называют *коллинеарными*. Признак коллинеарности векторов \vec{a} и \vec{b} является пропорциональность их координат:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{z_1}{z_2}. \quad (15)$$

Если векторы \vec{a} и \vec{b} взаимно перпендикулярны, то $x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2 = 0$.

Угол между векторами \vec{a} и \vec{b} определяется соотношением:

$$\cos \varphi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}. \quad (16)$$

Уравнение плоскости, проходящей через точку $M_0(x_0, y_0, z_0)$ перпендикулярно вектору $\vec{N} = (A, B, C)$, имеет вид

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0. \quad (17)$$

Пример выполнения задания.

Даны координаты трех точек: $A(3; 0; -5)$, $B(6; 2; 1)$, $C(12; -12; 3)$.

Требуется: 1) записать векторы \vec{AB} и \vec{AC} в системе орт и найти модули этих векторов; 2) найти угол между векторами \vec{AB} и \vec{AC} ; 3) составить уравнение плоскости, проходящей через точку C перпендикулярно вектору \vec{AB} .

Решение:

1) Найдем координаты вектора \vec{AB} , подставив в формулу (11) координаты точек A и B , и запишем разложение этого вектора по ортам (13):

$$\vec{AB} = (6-3)\vec{i} + (2-0)\vec{j} + (1+5)\vec{k} = 3\vec{i} + 2\vec{j} + 6\vec{k}.$$

Подобным образом

$$\vec{AC} = (12-3)\vec{i} + (-12-0)\vec{j} + (3+5)\vec{k} = 9\vec{i} - 12\vec{j} + 8\vec{k}.$$

Модули векторов \vec{AB} и \vec{AC} найдем, подставляя их координаты в формулу (12):

$$\left| \vec{AB} \right| = \sqrt{3^2 + 2^2 + 6^2} = 7, \quad \left| \vec{AC} \right| = \sqrt{9^2 + (-12)^2 + 8^2} = 17.$$

2) Найдем косинус угла φ между векторами \vec{AB} и \vec{AC} . Для этого вычислим их скалярное произведение по формуле (14):

$$\vec{AB} \cdot \vec{AC} = 3 \cdot 9 + 2 \cdot (-12) + 6 \cdot 8 = 51.$$

Тогда по формуле (16)

$$\cos \varphi = \frac{51}{7 \cdot 17} \approx 0,4286, \quad \varphi \approx 64^\circ 37' \approx 1,13 \text{ рад.}$$

3) По условию задачи искомая плоскость проходит через точку $C(12; -12; 3)$ перпендикулярно вектору $\vec{AB} = (3, 2, 6)$. Подставляя в (17) $A = 3$, $B = 2$, $C = 6$, $x_0 = 12$, $y_0 = -12$, $z_0 = 3$, получим:

$$3(x - 12) + 2(y + 12) + 6(z - 3) = 0,$$

или $3x + 2y + 6z - 30 = 0$ – искомое уравнение плоскости.

Задача 3.

Теоретические сведения.

Векторы называются компланарными, если они лежат в одной плоскости или в параллельных плоскостях. Условием компланарности трех векторов $\vec{a}_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $\vec{a}_2 = (x_2, y_2, z_2)$, $\vec{a}_3 = (x_3, y_3, z_3)$ является равенство нулю их смешанного произведения:

$$(\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3) = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

Три вектора образуют *базис* в том случае, если они *некомпланарны*.

Если для векторов $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ выполняется условие $(\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3) \neq 0$, то они образуют базис, и любой четвертый вектор $\vec{b} = (b_1, b_2, b_3)$ может быть представлен разложением по этому базису в виде

$$\vec{b} = \alpha \vec{a}_1 + \beta \vec{a}_2 + \gamma \vec{a}_3, \quad (19)$$

где α, β, γ – координаты вектора \vec{b} в базисе, образованном векторами $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$.

Координаты α, β, γ находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 = b_1 \\ \alpha y_1 + \beta y_2 + \gamma y_3 = b_2 \\ \alpha z_1 + \beta z_2 + \gamma z_3 = b_3 \end{cases} \quad (20)$$

Пример выполнения задания.

Показать, что векторы $\vec{a}_1(3; 1; 4)$, $\vec{a}_2(2; 1; -1)$, $\vec{a}_3(1; -1; 5)$ образуют базис трехмерного пространства. Найти координаты вектора $\vec{b}(5; 0; 3)$ в этом базисе.

Решение:

Вычислим смешанное произведение векторов $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$:

$$(\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3) = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 4 \\ 2 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 5 \end{vmatrix} = -11 \neq 0.$$

Так как смешанное произведение отлично от нуля, то векторы некомпланарны и образуют базис. Координаты вектора \vec{b} в этом базисе найдем, разложив его по векторам $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ следующим образом:

$$\vec{b} = \alpha \vec{a}_1 + \beta \vec{a}_2 + \gamma \vec{a}_3,$$

а координаты вектора \vec{b} в новом базисе найдем из системы уравнений (20)

$$\begin{cases} \alpha \cdot 3 + \beta \cdot 2 + \gamma \cdot 1 = 5 \\ \alpha \cdot 1 + \beta \cdot 1 + \gamma \cdot (-1) = 0 \\ \alpha \cdot 4 + \beta \cdot (-1) + \gamma \cdot 5 = 3 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} 3\alpha + 2\beta + \gamma = 5 \\ \alpha + \beta - \gamma = 0 \\ 4\alpha - \beta + 5\gamma = 3 \end{cases}$$

Решим эту систему для заданных векторов методом Гаусса.

Поменяем местами первое и второе уравнения

$$\begin{cases} \alpha + \beta - \gamma = 0 \\ 3\alpha + 2\beta + \gamma = 5 \\ 4\alpha - \beta + 5\gamma = 3 \end{cases}.$$

После этого умножим первое уравнение на (-3) и сложим со вторым. Далее умножим первое уравнение на (-4) и сложим с третьим. Получим:

$$\begin{cases} \alpha + \beta - \gamma = 0 \\ -\beta + 4\gamma = 5 \\ -5\beta + 9\gamma = 3 \end{cases}.$$

Затем умножаем второе уравнение на (-5) и складываем с третьим:

$$\begin{cases} \alpha + \beta - \gamma = 0 \\ -\beta + 4\gamma = 5 \\ -11\gamma = -22 \end{cases}.$$

Из последнего уравнения имеем $\gamma = 2$. Подставляем это значение во второе уравнение, получаем $\beta = 3$ и, наконец, из первого уравнения находим $\alpha = -1$.

Таким образом, подставив в уравнение (19) координаты вектора \vec{b} , получим

$$\vec{b} = -\vec{a}_1 + 3\vec{a}_2 + 2\vec{a}_3.$$

Задача 4.

Теоретические сведения.

Неоднородная система трех уравнений с тремя неизвестными в общем случае имеет вид

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = h_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = h_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = h_3 \end{cases}$$

и может быть записана в матричном виде

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{H}, \quad (21)$$

где $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$ - матрица коэффициентов при неизвестных,

$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$ - матрица-столбец неизвестных,

$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix}$ матрица-столбец свободных членов.

Если матрица \mathbf{A} – невырожденная, то есть имеет определитель, отличный от нуля, то существует матрица \mathbf{A}^{-1} , обратная к \mathbf{A} , так что $\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{E}$ (\mathbf{E} - единичная матрица). Умножим обе части уравнения (22) на \mathbf{A}^{-1} и получим

$$\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{H},$$

или

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{H}, \quad (23)$$

поскольку $\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X}$.

Равенство (23) является решением системы уравнений (22).

Матрица, обратная к невырожденной матрице \mathbf{A} , находится по формуле

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где A_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$) – алгебраическое дополнение элемента a_{ij} , которое является произведением $(-1)^{i+j}$ на минор (определитель) второго порядка, полученный вычеркиваем i -й строки и j -го столбца в определителе матрицы \mathbf{A} ; Δ – определитель матрицы \mathbf{A} .

Пример выполнения задания.

Данную систему уравнений записать в матричной форме и решить ее с помощью обратной матрицы:

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + x_3 = 1 \\ 2x_1 + 3x_2 - x_3 = 8 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 = -1 \end{cases}$$

Решение:

Выпишем для данной системы уравнений матрицу коэффициентов при неизвестных \mathbf{A} и столбец свободных членов \mathbf{H} :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 2 & 3 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 \\ 8 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Вычислим определитель Δ и алгебраические дополнения A_{ij} элементов матрицы \mathbf{A} :

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 2 & 3 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{vmatrix} = 10 \neq 0,$$

следовательно, матрица \mathbf{A} имеет обратную матрицу \mathbf{A}^{-1} .

$$A_{11} = (-1)^{1+1} \cdot \begin{vmatrix} 3 & -1 \\ -1 & 2 \end{vmatrix} = 5, \quad A_{12} = (-1)^{1+2} \cdot \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = -5, \quad A_{13} = (-1)^{1+3} \cdot \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -5,$$

$$A_{21} = (-1)^{2+1} \cdot \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 2 \end{vmatrix} = 3, \quad A_{22} = (-1)^{2+2} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 1, \quad A_{23} = (-1)^{2+3} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -1,$$

$$A_{31} = (-1)^{3+1} \cdot \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ 3 & -1 \end{vmatrix} = -1, \quad A_{32} = (-1)^{3+2} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & -1 \end{vmatrix} = 3, \quad A_{33} = (-1)^{3+3} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 3 \end{vmatrix} = 7.$$

Тогда по формуле (24) обратная матрица равна

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 5 & 3 & -1 \\ -5 & 1 & 3 \\ -5 & -1 & 7 \end{pmatrix}.$$

По формуле (23) находим решение данной системы уравнений в матричной форме:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{H} = \frac{1}{10} \cdot \begin{pmatrix} 5 & 3 & -1 \\ -5 & 1 & 3 \\ -5 & -1 & 7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 8 \\ -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{10} \cdot \begin{pmatrix} 5 \cdot 1 + 3 \cdot 8 + (-1) \cdot (-1) \\ -5 \cdot 1 + 1 \cdot 8 + 3 \cdot (-1) \\ -5 \cdot 1 - 1 \cdot 8 + 7 \cdot (-1) \end{pmatrix} = \frac{1}{10} \cdot \begin{pmatrix} 30 \\ 0 \\ -20 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}.$$

Отсюда $x_1 = 3$, $x_2 = 0$, $x_3 = -2$.

Задача 5.

Теоретические сведения.

Число A называют пределом функции $y=f(x)$ в точке a , если эта функция определена в некоторой окрестности точки a , за исключением, быть может, самой точки a , и для каждого $\varepsilon > 0$ найдется такое $\delta > 0$, что для всех x , удовлетворяющих условию $0 < |x - a| < \delta$, выполняется неравенство $|f(x) - A| < \varepsilon$:

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A, \text{ если } \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 : \forall x : 0 < |x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - A| < \varepsilon.$$

Вычисление пределов арифметических выражений $f_1(x)/f_2(x)$, $f_1(x) \cdot f_2(x)$, $f_1(x) - f_2(x)$ по пределам функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$, из которых они

составлены, не всегда возможно. В этих случаях говорят, что возникают неопределенности следующих видов:

$$\left(\frac{0}{0}\right), \left(\frac{\infty}{\infty}\right), (0 \cdot \infty), (\infty - \infty), (1^\infty).$$

Для нахождения пределов таких неопределенных выражений нужно учитывать конкретный вид функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$. Например,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{C}{x^n} = 0; \quad (25)$$

предел отношения двух многочленов $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{P_n(x)}{Q_m(x)} = \left(\frac{\infty}{\infty}\right) = \begin{cases} \infty, & \text{если } n > m \\ \frac{a_n}{b_m}, & \text{если } n = m \\ 0, & \text{если } n < m. \end{cases}$

первый замечательный предел $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = \left(\frac{0}{0}\right) = 1;$ (26)

второй замечательный предел $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = (1)^\infty = e.$ (27)

Величина $\alpha(x)$ называется *бесконечно малой* при $x \rightarrow a$, если $\lim_{x \rightarrow a} \alpha(x) = 0$.

Две бесконечно малые величины называются *эквивалентными*, если предел их отношения равен 1, то есть $\alpha(x) \sim \beta(x)$, если $\lim_{x \rightarrow a} \frac{\alpha(x)}{\beta(x)} = \left(\frac{0}{0}\right) = 1$. Под знаком предела любая бесконечно малая величина может быть заменена на эквивалентную ей. Приведем таблицу эквивалентных бесконечно малых при $x \rightarrow 0$ величин:

$$\begin{aligned} \sin x \sim x, \quad \arcsin x \sim x, \quad a^x - 1 \sim x \cdot \ln a \quad e^x - 1 \sim x, \\ \operatorname{tg} x \sim x, \quad \operatorname{arctg} x \sim x, \quad 1 - \cos x \sim \frac{x^2}{2}. \end{aligned} \quad (28)$$

Пример выполнения задания.

Вычислить пределы:

$$\text{а) } \lim_{x \rightarrow -3} \frac{4x^2 + 11x - 3}{3x^2 + 10x + 3}, \quad \text{б) } \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sqrt{x^2 + 3x} - x \right),$$

$$\text{в) } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x}{\operatorname{arctg} 5x},$$

$$\text{г) } \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{2x-3}{2x+1} \right)^{4x+5}.$$

Решение:

а) Подстановка предельного значения аргумента $x=-3$ приводит к неопределенному выражению вида $\left(\frac{0}{0}\right)$.

Для устранения этой неопределенности разложим числитель и знаменатель дроби на множители и сократим дробь на множитель $(x+3)$. Такое сокращение здесь возможно, так как множитель $(x+3)$ отличен от нуля при $x \rightarrow -3$:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow -3} \frac{4x^2 + 11x - 3}{3x^2 + 10x + 3} &= \frac{4 \cdot (-3)^2 + 11 \cdot (-3) - 3}{3 \cdot (-3)^2 + 10 \cdot (-3) + 3} = \left(\frac{0}{0}\right) = \\ &= \lim_{x \rightarrow -3} \frac{(4x-1)(x+3)}{(3x+1)(x+3)} = \lim_{x \rightarrow -3} \frac{4x-1}{3x+1} = \frac{4 \cdot (-3) - 1}{3 \cdot (-3) + 1} = \frac{13}{8}. \end{aligned}$$

б) При $x \rightarrow \infty$ выражение $\sqrt{x^2 + 3x} - x$ дает неопределенность вида $(\infty - \infty)$. Для ее устранения умножим и разделим это выражение на $\sqrt{x^2 + 3x} + x$, после чего разделим числитель и знаменатель полученной дроби на x , учитывая формулу (25):

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} (\sqrt{x^2 + 3x} - x) &= (\infty - \infty) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(\sqrt{x^2 + 3x} - x)(\sqrt{x^2 + 3x} + x)}{(\sqrt{x^2 + 3x} + x)} = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2 + 3x - x^2}{\sqrt{x^2 + 3x} + x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3x}{\sqrt{x^2 + 3x} + x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3}{\sqrt{1 + \frac{3}{x}} + 1} = \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

в) При $x \rightarrow 0$ получим неопределенность $\left(\frac{0}{0}\right)$. Обозначим $\operatorname{arctg} 5x = y$. Тогда $5x = \operatorname{tg} y$

и $y \rightarrow 0$ при $x \rightarrow 0$. Применяя свойства пределов и формулу (26), имеем:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x}{\operatorname{arctg} 5x} = \left(\frac{0}{0}\right) = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{2 \left(\frac{1}{5} \operatorname{tg} y\right)}{y} = \frac{2}{5} \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\sin y}{y} \cdot \lim_{y \rightarrow 0} \frac{1}{\cos y} = \frac{2}{5} \cdot 1 \cdot 1 = \frac{2}{5}.$$

Эту задачу можно решить, используя эквивалентные замены бесконечно малых величин (28). Поскольку при $x \rightarrow 0$ эквивалентны $\operatorname{arctg} 5x \sim 5x$, можно записать

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x}{\operatorname{arctg} 5x} = \left(\frac{0}{0} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x}{5x} = \frac{2}{5}.$$

г) При $x \rightarrow \infty$ выражение $\left(\frac{2x-3}{2x+1} \right)^{4x+5}$ является неопределенностью вида (1^∞) . Для устранения этой неопределенности представим основание степени в виде суммы 1 и бесконечно малой (при $x \rightarrow \infty$) величины; после чего применим формулу второго замечательного предела (27):

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{2x-3}{2x+1} \right)^{4x+5} &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{2x+1-4}{2x+1} \right)^{4x+5} = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{-4}{2x+1} \right)^{4x+5} = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{-4}{2x+1} \right)^{\left(\frac{2x+1}{-4} \right) \cdot \left(\frac{-4}{2x+1} \right) \cdot (4x+5)} = \lim_{x \rightarrow \infty} e^{\frac{-4}{2x+1} \cdot (4x+5)} = \lim_{x \rightarrow \infty} e^{\frac{-16x-20}{2x+1}} = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} e^{\frac{-16}{2}} = \lim_{x \rightarrow \infty} e^{-8} = \frac{1}{e^8}. \end{aligned}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Основная литература

1. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры : Учебник для вузов / Д.В.Беклемишев. — 9-е изд., испр. — М.: Физматлит, 2007. — 312с.
2. 3. Клетеник Д.В. Сборник задач по аналитической геометрии: учебное пособие для втузов / под ред. Н.В.Ефимова. — 17-е изд., стер. — СПб. : Профессия, 2006. — 200с.
4. Кузнецов Л.А. Сборник заданий по высшей математике: Типовые расчеты : учеб. пособие / Л. А. Кузнецов. — 9-е изд., стер. — СПб. [и др.] : Лань, 2007. — 240 с.
5. Бермант А.Ф. Краткий курс математического анализа : учеб. пособие для вузов / А. Ф. Бермант, И. Г. Араманович. — 14-е изд., стер. — СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2008. — 736 с.
6. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления : учеб. пособие для втузов. в 2 т., Т.1 / Н.С.Пискунов. — Изд.стер. — М. : Интеграл-Пресс, 2007. — 416с
7. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления : учеб. пособие для втузов. в 2 т., Т.2 / Н.С.Пискунов. — Изд.стер. — М.: Интеграл-Пресс, 2006. — 544с.
8. Сборник задач по математике для втузов : в 4 ч. Ч.1 / А.В.Ефимов [и др.]; под ред.А.В.Ефимова, А.С.Поспелова. — М. : Физматлит, 2004. — 288с.
9. Сборник задач по математике для втузов : в 4 ч. Ч.2 / А.В.Ефимов [и др.];под ред. А.В.Ефимова, А.С.Поспелова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Физматлит, 2004. — 432с.

2. Дополнительная литература

1. Аверин В.В. Математика: курс лекций: учеб. пособие/ В.В. Аверин, М.Ю. Соколова, Д.В.Христич: ТулГУ – Тула: Изд. ТулГУ, 2010, Ч.1- 254с.
2. Аверин В.В. Математика: курс лекций: учеб. пособие/ В.В. Аверин, М.Ю. Соколова, Д.В.Христич: ТулГУ – Тула: Изд. ТулГУ, 2010, Ч.2- 275с.
- Ильин В.А., Аналитическая геометрия : учебник для вузов / В.А.Ильин, Э.Г.Позняк. — 6-е изд.,стер. — М. : Физматлит, 2003. — 240с.

Второй семестр

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Теоретические сведения.

Производной от функции $y = f(x)$ по аргументу x называется предел отношения приращения функции Δy к приращению аргумента Δx , когда последнее стремится к нулю:

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Производная есть скорость изменения функции в точке x .

Отыскание производной называется дифференцированием функции.

Основные правила дифференцирования:

1. $(C)' = 0$, где $C = \text{Const}$.

2. $(x)' = 1$

3. $(u(x) \pm v(x))' = u'(x) \pm v'(x)$

4. $(u(x) \cdot v(x))' = u'(x) \cdot v(x) + u(x) \cdot v'(x)$, $(C \cdot u(x))' = C \cdot u'(x)$

5. $\left(\frac{u(x)}{v(x)}\right)' = \frac{u'(x) \cdot v(x) - u(x) \cdot v'(x)}{v^2(x)}$, $\left(\frac{C}{v(x)}\right)' = \frac{-C \cdot v'(x)}{v^2(x)}$, $\left(\frac{u(x)}{C}\right)' = \frac{u'(x)}{C}$

6. $F'(u(x)) = F'_u \cdot u'(x)$

Таблица производных элементарных функций ($u = u(x)$):

1. $(u^n)' = n \cdot u^{n-1} \cdot u'$,

4. $(\sin u)' = \cos u \cdot u'$

2. $(a^u)' = a^u \cdot \ln a \cdot u'$, $(e^u)' = e^u \cdot u'$, 5. $(\cos u)' = -\sin u \cdot u'$

3. $(\log_a u)' = \frac{1}{u \cdot \ln a} \cdot u'$, 6. $(\operatorname{tg} u)' = \frac{1}{\cos^2 u} \cdot u'$, 7. $(\operatorname{ctg} u)' = -\frac{1}{\sin^2 u} \cdot u'$,

8. $(\arcsin u)' = \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \cdot u'$, $(\arccos u)' = -\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \cdot u'$

9. $(\operatorname{arctg} u)' = \frac{1}{1+u^2} \cdot u'$, $(\operatorname{arcctg} u)' = -\frac{1}{1+u^2} \cdot u'$

Если в таблице положить $u(x) = x$, то $u' = 1$.

Пример выполнения задания.

Найдите производные функций:

а) $y = \ln(2 + \sin 3x)$; б) $y = (3^{\operatorname{arctg} \sqrt{x}} + 1)^4$; в) $\cos(xy^2) - 3y^2 + 4x = 0$.

Решение:

а) последовательно применяя правила дифференцирования сложной функции, правила и формулы дифференцирования, имеем:

$$y' = (\ln(2 + \sin 3x))' = \frac{1}{2 + \sin 3x} \cdot (2 + \sin 3x)' = \frac{1}{2 + \sin 3x} \cdot (2' + (\sin 3x)') =$$

$$= \frac{1}{2 + \sin 3x} \cdot \cos 3x \cdot (3x)' = \frac{3 \cos 3x}{2 + \sin 3x};$$

$$б) \quad y' = ((3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)^4)' = 4(3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)^3 \cdot (3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)' =$$

$$= 4(3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)^3 \cdot 3^{\arctg \sqrt{x}} \cdot \ln 3 \cdot (\arctg \sqrt{x})' =$$

$$= 4(3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)^3 \cdot 3^{\arctg \sqrt{x}} \cdot \ln 3 \cdot \frac{1}{1 + (\sqrt{x})^2} \cdot (\sqrt{x})' =$$

$$= 4(3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)^3 \cdot 3^{\arctg \sqrt{x}} \cdot \ln 3 \cdot \frac{1}{1 + (\sqrt{x})^2} \cdot \frac{1}{2\sqrt{x}} = \frac{2 \ln 3}{(1 + x)\sqrt{x}} \cdot 3^{\arctg \sqrt{x}} \cdot (3^{\arctg \sqrt{x}} + 1)^3$$

в) в данном случае функциональная зависимость задана в *неявном* виде. Для нахождения производной y' нужно продифференцировать по переменной x обе части уравнения, считая при этом y функцией от x , а затем полученное уравнение разрешить относительно y' :

$$-\sin(xy^2) \cdot (xy^2)' - 3 \cdot 2yy' + 4 = 0;$$

$$-\sin(xy^2) \cdot (x'y^2 + x(y^2)') - 6yy' + 4 = 0;$$

$$-\sin(xy^2) \cdot (y^2 + 2xyy') - 6yy' + 4 = 0;$$

$$-y^2 \sin(xy^2) - 2xyy' \sin(xy^2) - 6yy' + 4 = 0;$$

Из последнего уравнения находим y' :

$$2yy'(x \sin(xy^2) + 3) = 4 - y^2 \sin(xy^2);$$

$$y' = \frac{4 - y^2 \sin(xy^2)}{2y(x \sin(xy^2) + 3)}.$$

Задача 2.

Теоретические сведения. Исследование функции одной независимой переменной будем проводить по следующей схеме:

1. Найдем область определения функции.
2. Исследуем функцию на непрерывность.

3. Установим, является ли данная функция четной, нечетной или функцией общего вида.
4. Найдем интервалы возрастания и убывания функции, точки экстремума.
5. Найдем интервалы выпуклости и вогнутости кривой, точки ее перегиба.
6. Найдем асимптоты кривой.

Пример выполнения задания.

Исследовать функцию $y = \frac{2x-1}{(x-1)^2}$ и построить ее график.

Решение.

Реализуем приведенную схему исследования функции:

1. Функция определена при всех значениях аргумента x , кроме $x=1$.
2. Данная функция является элементарной, поэтому она непрерывна на своей области определения, то есть на интервалах $(-\infty;1)$ и $(1;+\infty)$.

В точке $x=1$ функция терпит разрыв.

3. Для установления четности или нечетности функции проверим выполнимость равенств $f(-x) = f(x)$ (тогда $f(x)$ – четная функция) или $f(-x) = -f(x)$ (для нечетной функции) для любых x из области определения функции:

$$f(-x) = \frac{-2x-1}{(-x-1)^2}, \quad -f(x) = -\frac{2x-1}{(x-1)^2}.$$

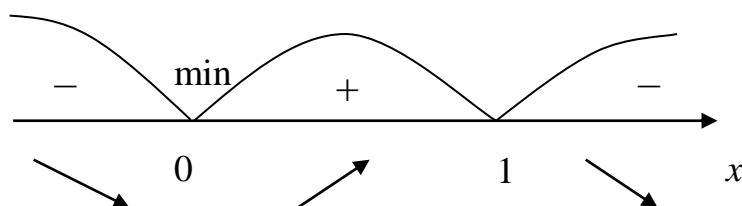
Следовательно, $f(-x) \neq f(x)$ и $f(-x) \neq -f(x)$, то есть данная функция является функцией общего вида.

4. Для исследования функции на экстремум найдем ее первую производную:

$$y' = \frac{2(x-1)^2 - (2x-1) \cdot 2(x-1)}{(x-1)^4} = -\frac{2x}{(x-1)^3}.$$

Определим критические точки функции: $y' = 0$ при $x=0$, y' не существует при $x=1$. Тем самым имеем две критические точки: $x=0$, $x=1$. Но точка $x=1$ не принадлежит области определения функции, экстремума в ней быть не может.

Разобьем числовую ось на три интервала $(-\infty; 0)$, $(0; 1)$, $(1; +\infty)$.

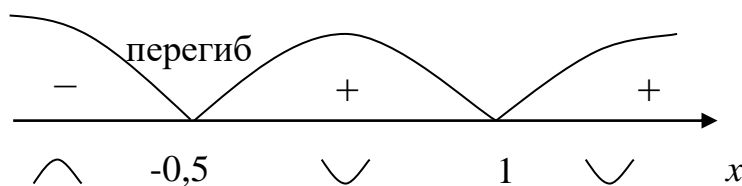


В первом и третьем интервалах первая производная отрицательна, следовательно, здесь функция убывает, во втором интервале – положительна, и данная функция возрастает. При переходе через точку $x=0$ первая производная меняет свой знак с минуса на плюс, поэтому в этой точке функция имеет минимум: $y_{\min} = y(0) = -1$. Значит, $A(0; -1)$ является точкой минимума.

5. Для определения точек перегиба графика функции и интервалов выпуклости и вогнутости кривой найдем вторую производную:

$$y'' = -2 \cdot \frac{(x-1)^3 - x \cdot 3(x-1)^2}{(x-1)^6} = 2 \cdot \frac{2x+1}{(x-1)^4}.$$

Для второй производной $y'' = 0$ при $x = -0,5$ и y'' не существует при $x = 1$. Разобьем числовую ось на три интервала $(-\infty; -0,5)$, $(-0,5; 1)$, $(1; +\infty)$.



На первом интервале вторая производная y'' отрицательна и дуга исследуемой кривой выпукла; на втором и третьем интервалах $y'' > 0$, поэтому график является вогнутым. При переходе через точку $x = -0,5$ вторая производная меняет свой знак, поэтому в этой точке кривая имеет перегиб: $y_{\text{пер}} = y(-0,5) = -\frac{8}{9}$.

Следовательно, $B\left(-\frac{1}{2}; -\frac{8}{9}\right)$ – точка перегиба графика функции.

6. В точке $x=1$ функция терпит разрыв, причем $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{2x-1}{(x-1)^2} = \infty$. Прямая $x=1$ является вертикальной асимптотой графика функции. Для определения уравнения наклонной асимптоты $y=kx+b$ воспользуемся формулами:

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x}, \quad b = \lim_{x \rightarrow \infty} (f(x) - kx).$$

$$\text{Тогда } k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x-1}{(x-1)^2 x} = 0, \quad b = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x-1}{(x-1)^2} = 0.$$

При найденных значениях k и b прямая $y=0$ есть горизонтальная асимптота графика исследуемой функции, представленного на рисунке 1.

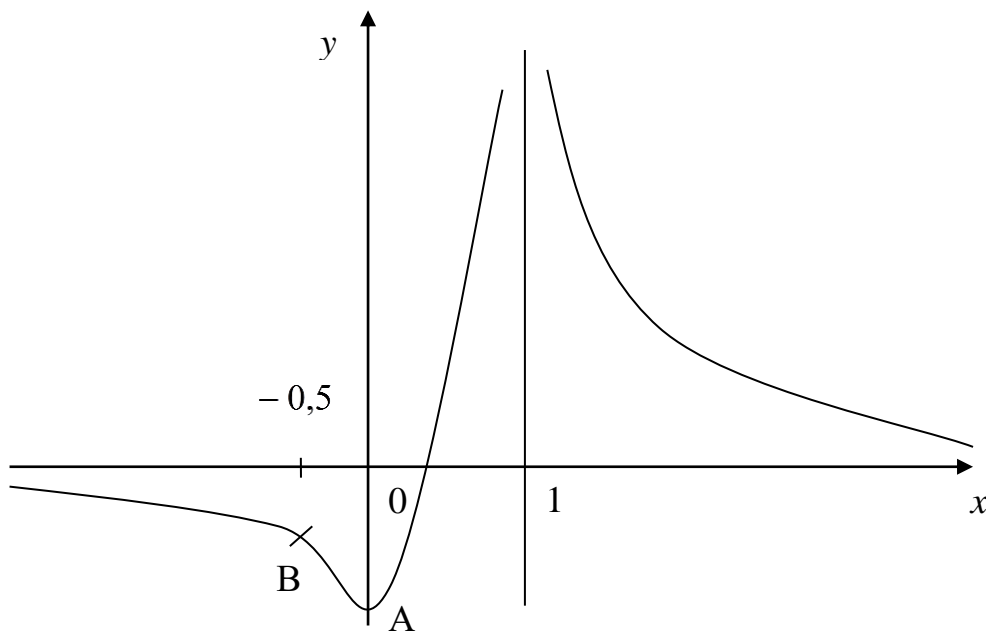


Рисунок 1. График исследуемой функции.

Задача 3.

Пример выполнения задания.

Резервуар, имеющий форму открытого сверху прямоугольного параллелепипеда с квадратным дном, нужно вылудить внутри оловом. Каковы должны быть размеры резервуара при его емкости 108 дм^3 , чтобы

затраты на его лужение были наименьшими?

Решение. Затраты на покрытие резервуара оловом будут наименьшими, если при данной вместимости площадь его поверхности будет минимальной.

Обозначим через a (дм) – сторону основания, b (дм) – высоту резервуара. Тогда площадь его поверхности $S = a^2 + 4ab$, а объем $V = a^2b$, или, согласно условия, $108 = a^2b$. Поэтому

$$b = \frac{108}{a^2} \quad \text{и} \quad S = a^2 + 4 \cdot a \cdot \frac{108}{a^2} = a^2 + \frac{432}{a}.$$

Полученное соотношение устанавливает зависимость между площадью поверхности резервуара S (функция) и стороной основания a (аргумент). Область определения этой функции $a > 0$, так как a – сторона основания. Исследуем функцию S на экстремум. Найдем первую производную S' , приравняем ее к нулю и решим полученное уравнение:

$$S' = 2a - \frac{432}{a^2} = \frac{2a^3 - 432}{a^2} = 0.$$

Отсюда $a = 6$. Производная $S'(a)$ не существует при $a = 0$, но это значение аргумента не принадлежит области определения функции. При $0 < a < 6$ производная $S'(a) < 0$, при $a > 6$ $S'(a) > 0$. Следовательно, при $a = 6$ функция S имеет минимум. Если $a = 6$, то $b = 3$. Таким образом, затраты на лужение резервуара емкостью 108 л будут наименьшими, если он имеет размеры $6(\text{дм}) \times 6(\text{дм}) \times 3(\text{дм})$.

Задача 4.

Теоретические сведения.

Переменная величина z называется *функцией двух переменных* x и y , если каждой паре значений (x, y) из данной области соответствует единственное определенное значение $z = f(x, y)$.

Для функции $z = f(x, y)$ вводятся понятия *частных производных* первого порядка, которые определяются выражениями:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y},$$

и *частных производных* второго порядка:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right).$$

Функция $z = f(x, y)$ имеет в точке $M_0(x_0, y_0)$ *максимум* (*минимум*), если значение этой функции в точке M_0 больше (меньше), чем значения функции в любой точке из окрестности точки M_0 .

Необходимыми условиями существования *экстремума* (максимума или минимума) дифференцируемой функции $z = f(x, y)$ является равенство нулю ее частных производных первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \end{cases}.$$

Точки, в которых частные производные обращаются в ноль, называются *стационарными точками* функции $z = f(x, y)$. Для того чтобы стационарная точка являлась *экстремумом*, в ней должны выполняться *достаточные условия*.

Обозначим $A = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \Big|_{M_0}$, $B = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \Big|_{M_0}$, $C = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \Big|_{M_0}$, $\Delta = AC - B^2$.

Если в стационарной точке $M_0(x_0, y_0)$

$\Delta > 0, A > 0$, то M_0 есть точка минимума;

$\Delta > 0, A < 0$, то M_0 есть точка максимума;

$\Delta < 0$, то в точке M_0 нет экстремума;

$\Delta = 0$, то требуется дополнительное исследование.

Пример выполнения задания.

Исследовать на экстремум функцию $z = 2x + 4y - x^2 - y^2 + 6$.

Решение.

1. Найдем частные производные заданной функции

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2 - 2x, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = 4 - 2y.$$

2. Запишем необходимые условия существования экстремума

$$\begin{cases} 2 - 2x = 0 \\ 4 - 2y = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = 1 \\ y = 2 \end{cases},$$

значит точка $M(1;2)$ является стационарной точкой функции.

3. Проверим выполнение в точке M достаточного условия. Для этого найдем вторые частные производные функции

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -2, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -2.$$

В точке $M(1;2)$ $A = -2, B = 0, C = -2$ и $\Delta = (-2) \cdot (-2) - 0 = 4$. Поскольку $\Delta = 4 > 0, A = -2 < 0$, точка $M(1;2)$ является точкой максимума. Значение функции в этой точке $z|_M = 2 \cdot 1 + 4 \cdot 2 - 1^2 - 2^2 + 6 = 11$.

Задача 5.

Теоретические сведения.

Функция двух независимых переменных $z = f(x, y)$ принимает наибольшее и наименьшее значения в области D , ограниченной линией $\varphi(x, y) = 0$, либо в стационарных точках, расположенных внутри области D , либо на границе этой области.

Задача об отыскании наибольшего и наименьшего значений функции $z = f(x, y)$ в заданной области D решается по следующему плану:

1. Определяем стационарные точки функции, расположенные внутри области D , и вычисляем значения функции в этих точках.

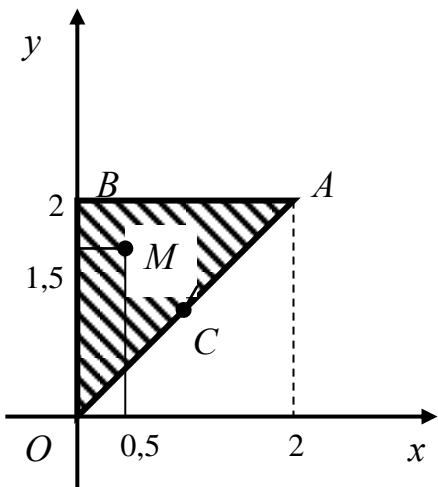
2. Находим стационарные точки функции на границе $\varphi(x, y) = 0$ области или на отдельных ее участках, заданных различными уравнениями, и вычисляем значения функции в этих точках.
3. Из всех вычисленных значений функции выбираем наибольшее и наименьшее.

Пример выполнения задания.

Найти наибольшее и наименьшее значения функции $z = x^2 + 2xy - 4x - y$ в треугольнике, ограниченном прямыми $x = 0$, $y = 2$, $y = x$.

Решение.

1. Найдем стационарные точки функции из условий равенства нулю частных производных функции



$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial x} = 2x + 2y - 4 = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial y} = 2x - 1 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = 0,5 \\ y = 1,5 \end{cases}$$

Стационарная точка $M(0,5;1,5)$ лежит внутри заданной области OAB .

Значение функции в точке M равно

$$z|_M = 0,5^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 1,5 - 4 \cdot 0,5 - 1,5 = -1,75.$$

2. Исследуем поведение функции на границах области:

а) на границе OA $y = x$, $0 \leq x \leq 2$, $z = x^2 + 2x \cdot x - 4 \cdot x - x$ или $z = 3x^2 - 5x$;

$$z' = 6x - 5, \quad z' = 0 \quad \text{при} \quad x = \frac{5}{6}, \quad \text{тогда} \quad y = \frac{5}{6} \quad (\text{так как } y=x).$$

$$\text{В точке } C\left(\frac{5}{6}; \frac{5}{6}\right) \text{ значение функции равно } z|_C = 3\left(\frac{5}{6}\right)^2 - 5 \cdot \frac{5}{6} = -\frac{25}{12}.$$

Вычислим значения функции в крайних точках отрезка OA .

В точке $O(0;0)$ $z|_O = 0$, в точке $A(2;2)$ значение функции равно

$$z|_A = 3 \cdot 2^2 - 5 \cdot 2 = 2.$$

б) на границе BA $y = 2$, $0 \leq x \leq 2$, $z = x^2 + 2x \cdot 2 - 4x - 2$ или $z = x^2 - 2$;

$z' = 2x$, $z' = 0$ при $x = 0$, а $y = 2$ согласно уравнению прямой BA .

В точке $B(0;2)$ значение функции равно $z|_B = 3 \cdot 0^2 - 2 = -2$.

в) на границе OB $x = 0$, $0 \leq y \leq 2$, $z = -y$;

$z' = -1 \neq 0$ при всех $y \in [0;2]$, следовательно, стационарных точек на линии OB нет.

3. Из всех вычисленных значений заданной функции выбираем наибольшее и наименьшее:

$z|_A = 2$ — наибольшее значение функции в области OAB

$z|_C = -\frac{25}{12}$ — наименьшее значение функции в области OAB

Задача 6.

Теоретические сведения.

Первообразной функцией для функции $f(x)$ называется такая функция $F(x)$, что $F'(x) = f(x)$.

Неопределенным интегралом от функции $f(x)$ называется ее общая первообразная

$$\int f(x)dx = F(x) + C.$$

Функция $f(x)$ называется *подынтегральной функцией*, $F(x)$ — результат интегрирования, C — произвольная постоянная.

Свойства неопределенного интеграла:

1. $\int (u(x) + v(x))dx = \int u(x)dx + \int v(x)dx.$

2. $\int A \cdot f(x)dx = A \cdot \int f(x)dx$, где A — постоянная.

3. Если $\int f(x)dx = F(x) + C$ и $u = \varphi(x)$, то $\int f(u)du = F(u) + C.$

Таблица простейших интегралов:

- | | |
|--|---|
| 1. $\int dx = x + C.$ | 7. $\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C.$ |
| 2. $\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C, (n \neq -1).$ | 8. $\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C.$ |
| 3. $\int \frac{dx}{x} = \ln x + C.$ | 9. $\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C.$ |
| 4. $\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C, \quad \int e^x dx = e^x + C.$ | 10. $\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a} + C.$ |
| 5. $\int \sin x dx = -\cos x + C.$ | 11. $\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \ln \frac{x-a}{x+a} + C, (a \neq 0).$ |
| 6. $\int \cos x dx = \sin x + C.$ | 12. $\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + A}} = \ln \left x + \sqrt{x^2 + A} \right + C, (A \neq 0).$ |

Основные методы интегрирования:

1. Подведение под знак дифференциала:

а) к функции, стоящей под знаком дифференциала, можно прибавлять или вычитать любую постоянную: $df(x) = d(f(x) \pm A);$

б) под знак дифференциала можно подводить постоянный множитель:

$$df(x) = \frac{1}{A} d(A \cdot f(x));$$

в) под знак дифференциала подводится функция по правилу: $f'(x)dx = df(x).$

2. Интегрирование по частям с использованием формулы:

$$\int u dv = uv - \int v du, \text{ где } u = u(x), v = v(x).$$

С помощью этого метода вычисляются следующие интегралы

а) $\int a^x \cdot P_n(x) dx, \quad u = P_n(x), \quad dv = a^x dx.$

б) $\int \sin ax \cdot P_n(x) dx, \quad u = P_n(x), \quad dv = \sin ax dx.$

в) $\int \cos ax \cdot P_n(x) dx, \quad u = P_n(x), \quad dv = \cos ax dx,$

г) $\int \ln ax \cdot P_n(x) dx, \quad u = \ln ax, \quad dv = P_n(x) dx,$

$$\text{д) } \int \arcsin ax \cdot P_n(x) dx, \quad u = \arcsin ax, \quad dv = P_n(x) dx,$$

$$\text{е) } \int \operatorname{arctg} ax \cdot P_n(x) dx, \quad u = \operatorname{arctg} ax, \quad dv = P_n(x) dx,$$

где $P_n(x)$ – многочлен n -ой степени.

3. Интегрирование методом замены переменной по формуле

$$\int f(x) dx = \int f(\varphi(t)) d\varphi(t) = \int f(\varphi(t)) \varphi'(t) dt, \quad \text{где } x = \varphi(t).$$

Пример выполнения задания.

Найти неопределенные интегралы:

$$\text{а) } \int \frac{(\arcsin x)^2 + x}{\sqrt{1-x^2}} dx; \quad \text{б) } \int \frac{x^3 - 17}{x^2 - 4x + 3} dx; \quad \text{в) } \int (3x + 4)e^{3x} dx.$$

Решение.

а) используя основные свойства неопределенного интеграла и выполняя подведение функций под знак дифференциала, найдем интеграл

$$\begin{aligned} \int \frac{(\arcsin x)^2 + x}{\sqrt{1-x^2}} dx &= \int \frac{(\arcsin x)^2}{\sqrt{1-x^2}} dx + \int \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} dx = \\ &= \int (\arcsin x)^2 d(\arcsin x) + \int (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} d\left(\frac{x^2}{2}\right) = \\ &= \int (\arcsin x)^2 d(\arcsin x) + \left(-\frac{1}{2}\right) \int (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} d(1-x^2) = \\ &= \frac{1}{3} (\arcsin x)^3 - \frac{1}{2} \cdot \frac{(1-x^2)^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}} + C = \frac{1}{3} (\arcsin x)^3 - \sqrt{1-x^2} + C. \end{aligned}$$

Проверим результат интегрирования дифференцированием:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{3} (\arcsin x)^3 - \sqrt{1-x^2} + C \right)' &= \\ = \frac{1}{3} \cdot 3(\arcsin x)^2 \cdot (\arcsin x)' - \frac{1}{2} (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} (1-x^2)' + C' &= \end{aligned}$$

$$= \frac{(\arcsin x)^2}{\sqrt{1-x^2}} - \frac{-2x}{2\sqrt{1-x^2}} + 0 = \frac{(\arcsin x)^2 + x}{\sqrt{1-x^2}},$$

что совпадает с подынтегральной функцией.

б) подынтегральная функция представляет собой неправильную рациональную дробь. Представим эту дробь в виде суммы многочлена и правильной дроби. Для этого выполним деление многочлена на многочлен:

$$\begin{array}{r|l} x^3 - 17 & x^2 - 4x + 3 \\ \hline x^3 - 4x^2 + 3x & x + 4 \\ \hline 4x^2 - 3x - 17 & \\ \hline 4x^2 - 16x + 12 & \\ \hline 13x - 29 & \end{array}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \int \frac{x^3 - 17}{x^2 - 4x + 3} dx &= \int \left(x + 4 + \frac{13x - 29}{x^2 - 4x + 3} \right) dx = \int x dx + \int 4 dx + \int \frac{13x - 29}{x^2 - 4x + 3} dx = \\ &= \frac{x^2}{2} + 4x + \int \frac{13x - 29}{x^2 - 4x + 3} dx. \end{aligned}$$

Для того чтобы найти последний интеграл, представим правильную дробь в виде суммы простейших дробей. Для этого разложим на множители знаменатель дроби $x^2 - 4x + 3 = (x - 1)(x - 3)$ и разложим дробь на простейшие

$$\frac{13x - 29}{(x - 1)(x - 3)} = \frac{A}{x - 1} + \frac{B}{x - 3} = \frac{A(x - 3) + B(x - 1)}{(x - 1)(x - 3)},$$

значит $13x - 29 = A(x - 3) + B(x - 1)$.

При $x = 3$ имеем $13 \cdot 3 - 29 = B(3 - 1)$, откуда $B = 5$;

при $x = 1$ имеем $13 \cdot 1 - 29 = A(1 - 3)$, откуда $A = 8$.

Получаем $\frac{13x - 29}{(x - 1)(x - 3)} = \frac{8}{x - 1} + \frac{5}{x - 3}$ и интегрируем

$$\begin{aligned} \int \frac{13x - 29}{(x - 1)(x - 3)} dx &= \int \frac{8}{x - 1} dx + \int \frac{5}{x - 3} dx = 8 \int \frac{d(x - 1)}{x - 1} + 5 \int \frac{d(x - 3)}{x - 3} = \\ &= 8 \ln|x - 1| + 5 \ln|x - 3| + C \end{aligned}$$

и окончательно получаем

$$\int \frac{x^3 - 17}{x^2 - 4x + 3} dx = \frac{x^2}{2} + 4x + 8\ln|x-1| + \ln|x-3| + C.$$

Проверим результат дифференцированием:

$$\begin{aligned} \left(\frac{x^2}{2} + 4x + 8\ln|x-1| + \ln|x-3| + C \right)' &= \frac{2x}{2} + 4 + \frac{8}{x-1} + \frac{1}{x-3} = \\ &= \frac{(x+4)(x-1)(x-3) + 8(x-3) + (x-1)}{(x-1)(x-3)} = \frac{x^3 - 17}{x^2 - 4x + 3}, \end{aligned}$$

что совпадает с подынтегральной функцией.

Замечание.

Интеграл от правильной рациональной дроби сводится к сумме интегралов от простейших дробей. Наиболее часто встречаются следующие интегралы:

$$\int \frac{A}{x-a} dx = A\ln|x-a| + C; \quad \int \frac{A}{(x-a)^k} dx = \frac{A}{(-k+1)}(x-a)^{-k+1} + C, \quad (k=2,3,\dots).$$

в) применим методом интегрирования по частям.

Примем $u = 3x + 4$, $dv = e^{3x} dx$, тогда $du = 3dx$, $v = \frac{1}{3}e^{3x}$. По формуле

интегрирования по частям получаем

$$\begin{aligned} \int (3x+4)e^{3x} dx &= (3x+4)\frac{1}{3}e^{3x} - \int \frac{1}{3}e^{3x} \cdot 3dx = \frac{3x+4}{3}e^{3x} - \int e^{3x} dx = \\ &= \frac{3x+4}{3}e^{3x} - \frac{1}{3}e^{3x} + C = \frac{3x+4-1}{3}e^{3x} + C = e^{3x}(x+1) + C. \end{aligned}$$

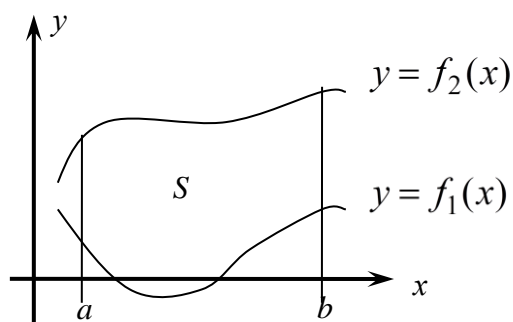
Проверим результат дифференцированием

$$(e^{3x}(x+1) + C)' = 3e^{3x}(x+1) + e^{3x} = e^{3x}(3(x+1) + 1) = e^{3x}(3x+4),$$

что совпадает с подынтегральной функцией.

Задача 7.

Теоретические сведения.



Если на плоскости Oxy задана фигура, ограниченная двумя непрерывными линиями $y = f_1(x)$, $y = f_2(x)$ и вертикальными прямыми $x = a$, $x = b$, то площадь S такой фигуры может быть вычислена по

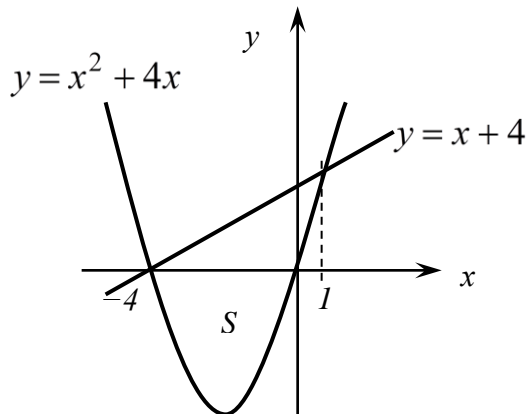
формуле $S = \int_a^b (f_2(x) - f_1(x)) dx$, где $f_2(x) \geq f_1(x)$ на отрезке $[a, b]$.

Пример выполнения задания.

Вычислить площадь фигуры, ограниченной линиями $y = x^2 + 4x$, $y = x + 4$.

Решение.

Заданные линии ограничивают на плоскости Oxy криволинейную трапецию, изображенную на рисунке.



Найдем координаты точек пересечения заданных линий, для этого решим систему уравнений

$$\begin{cases} y = x^2 + 4x \\ y = x + 4 \end{cases}, \quad x^2 + 4x = x + 4, \quad x^2 + 3x - 4 = 0, \quad \text{откуда } x_1 = -4, \quad x_2 = 1.$$

Тогда искомая площадь вычисляется по формуле:

$$S = \int_{-4}^1 (x + 4 - x^2 - 4x) dx = \int_{-4}^1 (4 - 3x - x^2) dx = \left(4x - \frac{3x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{-4}^1 =$$

$$= 4 - \frac{3}{2} - \frac{1}{3} + 16 + \frac{48}{2} - \frac{64}{3} = 20\frac{5}{6} \text{ (кв. ед.)}.$$

Задача 8.

Теоретические сведения.

Объемы тел, образованных вращением плоской фигуры, ограниченной кривой $y = f(x) \geq 0$, осью Ox и прямыми $x = a$, $x = b$,

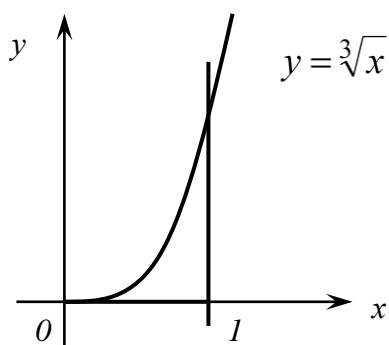
1) вокруг оси Ox , вычисляются по формуле $V_x = \pi \int_a^b f^2(x) dx$;

2) вокруг оси Oy , вычисляются по формуле $V_y = 2\pi \int_a^b xf(x) dx$.

Пример выполнения задания.

Вычислить объемы тел, образованных вращением вокруг осей Ox и Oy криволинейного треугольника, ограниченного кривой $y = \sqrt[3]{x}$, осью Ox и прямой $x = 1$.

Решение.



1) объем тела, полученного вращением вокруг оси Ox , равен

$$V_x = \pi \int_0^1 (\sqrt[3]{x})^2 dx = \pi \frac{x^{5/3}}{\frac{5}{3}} \Big|_0^1 = \frac{3\pi}{5} \text{ (куб. ед.)}$$

2) объем тела, полученного вращением вокруг оси Oy , равен

$$V_y = 2\pi \int_0^1 x \cdot \sqrt[3]{x} dx = 2\pi \frac{x^{7/3}}{7/3} \bigg|_0^1 = \frac{6\pi}{7} \text{ (куб. ед.)}.$$

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Теоретические сведения.

Дифференциальные уравнения, в которых переменные можно разделить посредством умножения обеих частей уравнения на одно и то же выражение, называют дифференциальными уравнениями *с разделяющимися переменными*:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f_2(x)}{f_1(y)} \rightarrow f_1(y) dy = f_2(x) dx, \quad (1)$$

или в дифференциальной форме

$$f_1(x) \cdot f_2(y) dx + f_3(x) f_4(y) dy = 0. \quad (2)$$

Разделим обе части уравнения (2) на произведение функций $f_2(y)f_3(x)$

$$\frac{f_1(x)}{f_3(x)} dx + \frac{f_4(y)}{f_2(y)} dy = 0 \quad (2')$$

и, после интегрирования, получим общий интеграл (общее решение) уравнения:

$$\int \frac{f_1(x)}{f_3(x)} dx + \int \frac{f_4(y)}{f_2(y)} dy = C.$$

При делении на $f_2(y)f_3(x)$ может произойти потеря некоторых частных решений. Пусть, например, при $y = y_0$ имеем $f_2(y_0) = 0$, тогда функция $y = y_0$

является решением уравнения (2'), т.к. $dy = dy_0 = 0$. Решением может также быть функция $x = x_0$, если $f_3(x_0) = 0$.

Пример выполнения задания.

Найти общий интеграл дифференциального уравнения первого порядка

$$x(y+1)dx - (x^2+1)ydy = 0.$$

Решение:

Данное дифференциальное уравнение является уравнением с разделяющимися переменными, причем $f_1(x) = x$; $f_2(y) = y+1$; $f_3(x) = x^2+1$; $f_4(y) = -y$. Разделим обе части уравнения на произведение

$$f_2(y)f_3(x) = (y+1)(x^2+1)$$

и получим

$$\frac{xdx}{x^2+1} - \frac{ydy}{y+1} = 0.$$

Проинтегрируем последнее равенство

$$\int \frac{xdx}{x^2+1} - \int \left(1 - \frac{1}{y+1}\right) dy = C,$$

используя подведение под знак дифференциала

$$\int \frac{\frac{1}{2}d(x^2+1)}{x^2+1} - \int dy + \int \frac{d(y+1)}{y+1} = C,$$

получим общий интеграл дифференциального уравнения

$$\frac{1}{2} \ln|x^2+1| - y + \ln|y+1| = C.$$

При делении на $f_2(y) = y+1$ потеряно частное решение: $y = -1$.

Задача 2.*Теоретические сведения.*

Дифференциальное уравнение первого порядка

$$y' + p(x)y = q(x), \quad (3)$$

линейное относительно искомой функции и её производной, называется *линейным*.

Уравнение (3) сводится к двум уравнениям с разделяющимися переменными следующим образом. Запишем искомую функцию $y(x)$ в виде произведения двух функций: $y = u(x) \cdot v(x)$. Одна из этих функций может быть абсолютно произвольной, а вторая определяется в зависимости от первой так, чтобы их произведение удовлетворяло уравнению (3).

Из равенства $y = u \cdot v$ находим $y' = u' \cdot v + u \cdot v'$. Тогда в соответствие с (3) имеем $u'v + uv' + p(x)uv = q(x)$ или $u'v + u(v' + p(x)v) = q(x)$. Выберем в качестве $v(x)$ какое-нибудь частное решение уравнения

$$v' + p(x)v = 0, \quad (4)$$

тогда для отыскания $u(x)$ получим уравнение

$$u'v = q(x). \quad (5)$$

Найдем $v(x)$, разделяя переменные в (4):

$$\frac{dv}{v} = -p(x)dx, \text{ откуда } \ln v = -\int p(x)dx \text{ и } v = e^{-\int p(x)dx}.$$

Зная $v(x)$, найдем $u(x)$ из уравнения (5):

$$\frac{du}{dx}v = q(x) \Rightarrow du = e^{\int p(x)dx} q(x)dx, \text{ тогда } u = \int q(x)e^{\int p(x)dx} dx + C.$$

Общее решение линейного уравнения (3) имеет вид

$$y = uv = e^{-\int p(x)dx} \left[\int q(x)e^{\int p(x)dx} dx + C \right].$$

Пример выполнения задания.

Найти общее решение дифференциального уравнения первого порядка $y' - 2y = 1$.

Решение.

Запишем искомую функцию $y(x)$ в виде произведения двух функций:

$$y = u(x) \cdot v(x), \text{ тогда } y' = u' \cdot v + u \cdot v',$$

и подставим полученные выражения в заданное уравнение

$$u'v + uv' - 2uv = 1.$$

Вынесем за скобки $u(x)$

$$u'v + u(v' - 2v) = 1$$

и, приравнявая к нулю выражение в скобках, получим и решим два дифференциальных уравнения с разделяющимися переменными:

$$v' - 2v = 0$$

$$\frac{dv}{v} = 2dx$$

$$\ln v = 2x$$

$$v = e^{2x}$$

$$u'v = 1$$

$$\frac{du}{dx} e^{2x} = 1$$

$$du = e^{-2x} dx$$

$$u = \int e^{-2x} dx,$$

$$u = -\frac{1}{2} \int e^{-2x} d(-2x) = -\frac{1}{2} e^{-2x} + C$$

Запишем общее решение заданного дифференциального уравнения в виде

$$y = uv = \left(-\frac{1}{2} e^{-2x} + C \right) \cdot e^{2x}, \text{ или } y = -\frac{1}{2} + C e^{2x}.$$

Задача 3.

Теоретические сведения.

Дифференциальное уравнение вида

$$y'' + a_1 y' + a_2 y = f(x) \quad (6)$$

называется неоднородным линейным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами a_1 и a_2 .

Общее решение этого уравнения $y = \bar{y} + y^*$, где \bar{y} – общее решение соответствующего однородного уравнения; y^* – частное решение уравнения (6).

Дифференциальное уравнение

$$y'' + a_1 y' + a_2 y = 0 \quad (7)$$

является однородным и называется соответствующим неоднородному уравнению (6). Общее решение однородного уравнения (7) находят по корням характеристического уравнения

$$r^2 + a_1 r + a_2 = 0.$$

Характеристическое уравнение может иметь три случая для корней r_1 и r_2 :

- 1) корни характеристического уравнения действительные и различные: $r_1 \neq r_2$.

В этом случае общее решение уравнения (7) записывается в виде

$$\bar{y} = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}, \text{ где } C_1, C_2 \text{ – произвольные постоянные;}$$

- 2) корни характеристического уравнения действительные и равные: $r_1 = r_2$. В

этом случае общее решение уравнения (7) записывается в виде

$$\bar{y} = e^{r_1 x} (C_1 + C_2 x), \text{ где } C_1, C_2 \text{ – произвольные постоянные;}$$

- 3) корни характеристического уравнения – комплексные сопряженные числа

$r_{1,2} = \alpha \pm \beta \cdot i$, $\beta \neq 0$. В этом случае общее решение уравнения (7) записывается

в виде $\bar{y} = e^{\alpha x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$, где C_1, C_2 – произвольные постоянные.

Частное решение y^* неоднородного уравнения (6) может быть найдено методом неопределенных коэффициентов в зависимости от вида правой части уравнения $f(x)$.

Первый случай. Правая часть уравнения (6) имеет вид $f(x) = P(x)e^{mx}$, где $P(x)$ – многочлен. Тогда уравнение (6) имеет частное решение вида

$$y^* = x^k Q(x) e^{mx}, \quad (8)$$

где $Q(x)$ – полный многочлен той же степени от x , что и $P(x)$, но с неопределенными коэффициентами;

$k = 0$, если число m не является корнем характеристического уравнения;

$k = 1$, если число m является простым корнем характеристического уравнения;

$k = 2$, если число m является двукратным корнем характеристического уравнения.

Правило сохраняет свою силу и при $m = 0$, когда $f(x) = P(x)$ – многочлен.

Неопределенные коэффициенты в многочлене $Q(x)$ определяют подстановкой функции (8) и ее производных в уравнение (6) с последующим приравниванием коэффициентов при одинаковых степенях x в обеих частях уравнения.

Пример выполнения задания.

Найти частное решение дифференциального уравнения второго порядка, удовлетворяющее заданным начальным условиям:

$$y'' - 3y' - 4y = 4x - 1, \quad y|_{x=0} = 2, \quad y'|_{x=0} = 3.$$

Решение. Характеристическое уравнение $r^2 - 3r - 4 = 0$ имеет два различных действительных корня $r_1 = -1$, $r_2 = 4$, следовательно, $\bar{y} = C_1 e^{-x} + C_2 e^{4x}$. Правая часть уравнения имеет вид $f(x) = 4x - 1 = (4x - 1) \cdot e^{0 \cdot x}$, где $m = 0$ и не является корнем характеристического уравнения. Тогда частное решение при $k = 0$ ищем в виде $y^* = x^0 \cdot (Ax + B) \cdot e^{0 \cdot x} = Ax + B$, $(y^*)' = A$, $(y^*)'' = 0$. После подстановки в дифференциальное уравнение получаем

$$0 - 3A - 4(Ax + B) = 4x - 1;$$

$$-3A - 4Ax - 4B = 4x - 1;$$

$$-4A \cdot x + (-3A - 4B) = 4 \cdot x + (-1);$$

$$x^1: -4A = 4; \quad A = -1$$

$$x^0: -3A - 4B = -1, \quad -4B = -1 + 3A = -4, \quad B = 1$$

Частным решением является функция $y^* = Ax + B = -1 \cdot x + 1 = 1 - x$. Общим решением является функция $y = \bar{y} + y^* = C_1 e^{-x} + C_2 e^{4x} - x + 1$.

Найдем значение констант C_1, C_2 из начальных условий. Для этого определим

$$y' = -C_1 e^{-x} + 4C_2 e^{4x} - 1.$$

$$\text{Тогда } \begin{cases} y|_{x=0} = C_1 + C_2 + 1 = 2, \\ y'|_{x=0} = -C_1 + 4C_2 - 1 = 3, \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 = 0, \\ C_2 = 1. \end{cases}$$

Искомым частным решением является функция $y = e^{4x} - x + 1$.

Пример выполнения задания.

Найти частное решение дифференциального уравнения второго порядка, удовлетворяющее заданным начальным условиям:

$$y'' - 4y' + 4y = e^{2x}, \quad y|_{x=0} = 2, \quad y'|_{x=0} = 3.$$

Решение. Характеристическое уравнение $r^2 - 4r + 4 = 0$ имеет двукратный корень $r_1 = 2$, следовательно, $\bar{y} = e^{2x}(C_1 + C_2 x)$. Правая часть уравнения имеет вид $f(x) = e^{2x}$, $m = 2$ является двукратным ($k = 2$) корнем характеристического уравнения, тогда частное решение ищем в виде

$$\begin{aligned} y^* &= x^2 \cdot A e^{2x}, \quad (y^*)' = x^2 \cdot 2A e^{2x} + 2x \cdot A e^{2x} = 2A e^{2x}(x^2 + x), \\ (y^*)'' &= 4A e^{2x}(x^2 + x) + 2A e^{2x}(2x + 1) = A e^{2x}(4x^2 + 8x + 2). \end{aligned}$$

После подстановки y^* и ее производных в исходное дифференциальное уравнение получаем

$$\begin{aligned} A e^{2x}(4x^2 + 8x + 2) - 4 \cdot 2A e^{2x}(x^2 + x) + 4A e^{2x} \cdot x^2 &= e^{2x}, \\ A e^{2x}(\cancel{4x^2} + \cancel{8x} + 2 - \cancel{8x^2} - \cancel{8x} + \cancel{4x^2}) &= e^{2x}, \\ 2A e^{2x} &= e^{2x}, \\ 2A &= 1, \quad A = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Частным решением является функция $y^* = \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2$. Общим решением является функция $y = \bar{y} + y^* = e^{2x}(C_1 + C_2x) + \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2$.

Найдем значение констант C_1, C_2 из начальных условий. Для этого определим производную

$$y' = e^{2x}(2C_1 + 2C_2x + C_2) + e^{2x}(x^2 + x),$$

и получим систему уравнений для определения значений произвольных констант

$$\begin{aligned} y|_{x=0} &= e^0 \cdot C_1 = 2, & C_1 &= 2 \\ y'|_{x=0} &= e^0(2C_1 + C_2) = 3, & C_2 &= -1 \end{aligned}$$

Искомым решением является функция $y = \bar{y} + y^* = e^{2x}(2 - x) + \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2$.

Второй случай. Правая часть уравнения (6) имеет вид $f(x) = a \cos nx + b \sin nx$.

Если числа $\pm in$ не являются корнями характеристического уравнения, то

$$y^* = A \cos nx + B \sin nx.$$

Если числа $\pm in$ являются корнями характеристического уравнения, то частное решение имеет вид

$$y^* = (A \cos nx + B \sin nx) \cdot x.$$

В частных случаях, когда a или b равно нулю, решение всё равно надо искать в указанном общем виде.

Пример выполнения задания.

Найти частное решение дифференциального уравнения второго порядка, удовлетворяющее заданным начальным условиям:

$$y'' + 4y' + 13y = 5 \sin 3x, \quad y|_{x=0} = \frac{1}{8}, \quad y'|_{x=0} = \frac{1}{2}.$$

Решение. Характеристическое уравнение $r^2 + 4r + 13 = 0$ имеет корни

$$r_{1,2} = \frac{-4 \pm \sqrt{4^2 - 4 \cdot 13}}{2} = \frac{-4 \pm \sqrt{-36}}{2} = \frac{-4 \pm 6i}{2} = -2 \pm 3i,$$

тогда $\bar{y} = e^{-2x} (C_1 \cos 3x + C_2 \sin 3x)$.

Числа $\pm 3i$ не являются корнями характеристического уравнения, поэтому

$$y^* = A \sin 3x + B \cos 3x,$$

$$(y^*)' = 3A \cos 3x - 3B \sin 3x,$$

$$(y^*)'' = -9A \sin 3x - 9B \cos 3x.$$

Подставляем y^* и ее производные в исходное уравнение и получаем

$$-9A \sin 3x - 9B \cos 3x + 4(3A \cos 3x - 3B \sin 3x) + 13(A \sin 3x + B \cos 3x) = C,$$

$$(4A - 12B) \sin 3x + (4B + 12A) \cos 3x = 5 \cdot \sin 3x + 0 \cdot \cos 3x;$$

$$\left. \begin{array}{l} \sin 3x: 4A - 12B = 5 \\ \cos 3x: 4B + 12A = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} A = \frac{1}{8} \\ B = -\frac{3}{8} \end{array} \right\}.$$

Общее решение уравнения имеет вид

$$y = e^{-2x} (C_1 \cos 3x + C_2 \sin 3x) + \frac{1}{8} \sin 3x - \frac{3}{8} \cos 3x.$$

Найдем значение констант C_1, C_2 из начальных условий. Для этого определим производную

$$y' = -2e^{-2x} (C_1 \cos 3x + C_2 \sin 3x) + e^{-2x} (-3C_1 \sin 3x + 3C_2 \cos 3x) + \frac{3}{8} \cos 3x + \frac{9}{8} \sin 3x$$

и запишем систему уравнений для определения значений произвольных констант

$$y|_{x=0} = e^0 (C_1 + C_2 \cdot 0) - \frac{3}{8} = \frac{1}{8},$$

$$y'|_{x=0} = -2e^0 (C_1 + C_2 \cdot 0) + e^0 (C_1 \cdot 0 + 3C_2) + \frac{3}{8} = \frac{1}{2},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \frac{1}{8} + \frac{3}{8} = \frac{1}{2}, \\ C_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} + \frac{5}{8} \right) = \frac{3}{8}. \end{array} \right.$$

Искомым решением является функция

$$y = e^{-2x} \left(\frac{1}{2} \cos 3x + \frac{3}{8} \sin 3x \right) + \frac{1}{8} \sin 3x - \frac{3}{8} \cos 3x.$$

КРАТНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ

Двойной интеграл в прямоугольных координатах

Пусть в ограниченной замкнутой области D на плоскости Oxy определена непрерывная функция $z = f(x, y)$. Разобьем область D на n областей с площадями ΔS_i , в каждой из них выберем произвольную точку (x_i, y_i) и составим *интегральную сумму* $\sum_{i=1}^n f(x_i, y_i) \Delta S_i$. Предел этой суммы при неограниченном увеличении числа областей разбиения и при стремлении диаметра наибольшей области $\max d_i$ к нулю называется *двойным интегралом* от функции $z = f(x, y)$ по области D :

$$\iint_D f(x, y) dS = \lim_{\max d_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i) \Delta S_i.$$

Элементарная площадь dS в декартовых координатах $dS = dxdy$.

Для вычисления двойного интеграла важное значение имеет вид области D .

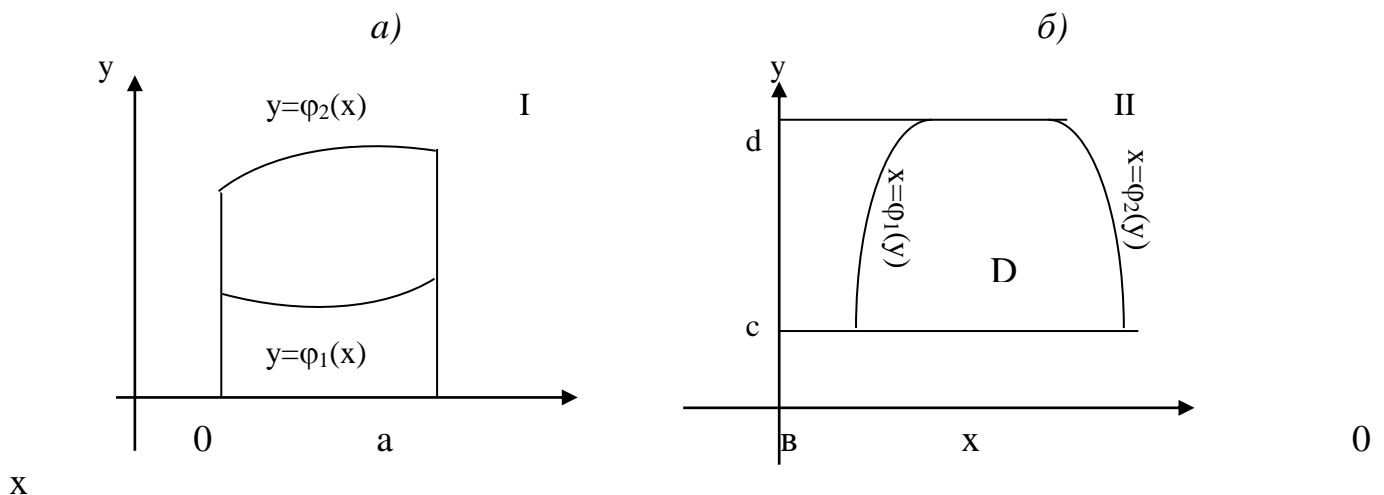


Рис. 1.

Если область D может быть задана так, как показано на *рис.1.а*, двойной интеграл вычисляется по формуле

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_a^b dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy. \quad (1)$$

Если область D имеет вид такой, как показано на *рис.1.б*, двойной интеграл вычисляется по формуле

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_c^d dy \int_{\varphi_1(y)}^{\varphi_2(y)} f(x, y) dx \quad (2)$$

В более сложных случаях область D разбивают на простые области типа I и II и пользуются *свойством аддитивности* двойного интеграла:

если $D = D_1 + D_2$, то
$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{D_1} f(x, y) dx dy + \iint_{D_2} f(x, y) dx dy.$$

Двойной интеграл в полярных координатах

Переход от прямоугольных декартовых координат к полярным выполняется по формулам

$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi, \quad x^2 + y^2 = \rho^2 \quad (3)$$

при условии, что полюс помещен в начале координат и полярная ось направлена вдоль оси Ox . Элемент площади в полярных координатах имеет вид:

$$dS = \rho d\rho d\varphi.$$

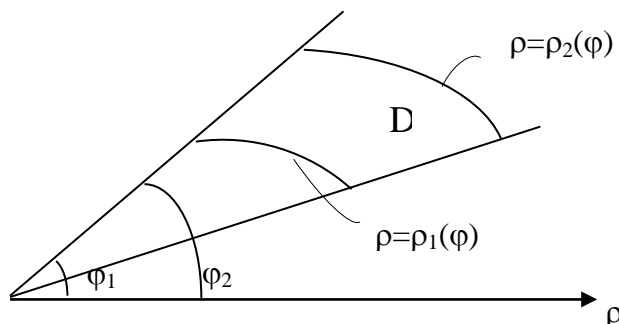


Рис. 2.

Если область D задана так, как показано на *рис.2* ($\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$, $\rho_1(\varphi) \leq \rho \leq \rho_2(\varphi)$), то переход к полярным координатам в двойном интеграле выполняется по формуле:

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} f(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi) \rho d\rho. \quad (4)$$

Если область D охватывает начало координат, в (4) надо положить $\rho_1(\varphi) = 0$.

Приложения двойных интегралов

Площадь плоской области D на плоскости Oxy вычисляется по формуле:

$$S = \iint_D dx dy. \quad (5)$$

Если D - плоская пластинка, лежащая в плоскости Oxy , с поверхностной плотностью $\gamma(x, y)$, то массу пластинки находят по формуле

$$m = \iint_D \gamma(x, y) dx dy. \quad (6)$$

Пример 1: С помощью двойного интеграла вычислить площадь области, ограниченной линиями $y = x^2 - 1$ и $y = 2$.

Решение: Построим область D . Граница $y = x^2 - 1$ - парабола, ось которой совпадает с осью Oy , а вершина расположена в точке $(-1, 0)$. Граница $y = 2$ - прямая, параллельная оси Ox . Область D симметрична относительно оси Oy , поэтому найдем площадь правой половинки области S_1 , а затем удвоим ее.

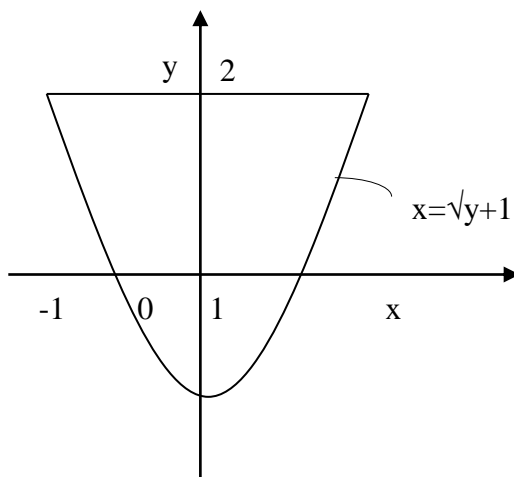


Рис. 3.

Спроектируем область D на ось Oy и воспользуемся для вычисления двойного интеграла формулой (13):

$$S_I = \iint_D dx dy = \int_{-1}^2 dy \int_0^{\sqrt{y+1}} dx = \int_{-1}^2 x \Big|_0^{\sqrt{y+1}} dy = \int_{-1}^2 \sqrt{y+1} dy = \frac{2}{3} (y+1)^{\frac{3}{2}} \Big|_{-1}^2 = 2\sqrt{3}.$$

Тогда площадь всей области D равна $S = 2S_I = 4\sqrt{3}$.

Ответ: $S = 4\sqrt{3}$.



Пример 2. Вычислить площадь плоской области, ограниченной кривой

$$(x^2 + y^2)^2 = 2ax^3, \quad (a > 0).$$

Решение: Введем полярные координаты (14), тогда уравнение кривой примет вид $\rho^4 = 2a\rho^3 \cos^3 \varphi$, или $\rho = 2a \cos^3 \varphi$.

Область D показана на рис. 4.

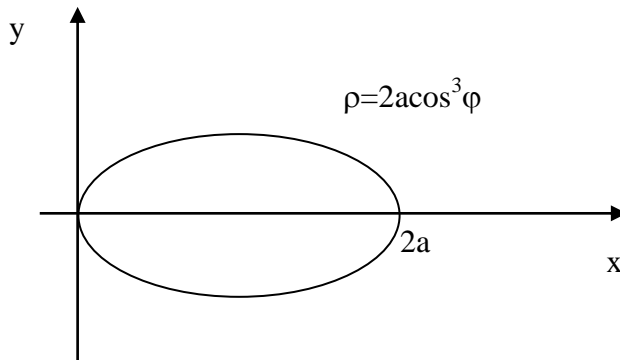


Рис. 4.

Эта область симметрична относительно оси x , поэтому достаточно вычислить площадь верхней половины области D и результат удвоить. Для верхней половины угол φ меняется от 0 до $\pi/2$, а ρ меняется от 0 до $2a \cos^3 \varphi$, поэтому

$$\begin{aligned}
\frac{S}{2} &= \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{2a \cos^3 \varphi} \rho d\rho = \int_0^{\pi/2} \frac{\rho^2}{2} \Big|_0^{2a \cos^3 \varphi} d\varphi = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} 4a^2 \cos^6 \varphi d\varphi = \frac{a^2}{4} \int_0^{\pi/2} (1 + \cos 2\varphi)^3 d\varphi = \\
&= \frac{a^2}{4} \int_0^{\pi/2} (1 + 3\cos 2\varphi + 3\cos^2 2\varphi + \cos^3 2\varphi) d\varphi = \frac{a^2}{4} \left[\left(\varphi + \frac{3}{2} \sin 2\varphi \right) \Big|_0^{\pi/2} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{3}{2} \int_0^{\pi/2} (1 + \cos 4\varphi) d\varphi + \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 2\varphi) d \sin \phi \right] = \\
&= \frac{a^2}{4} \left[\frac{\pi}{2} + \left(\varphi + \frac{3}{2} \sin 2\varphi \right) \Big|_0^{\pi/2} + \frac{1}{2} \left(\sin 2\varphi - \frac{\sin^3 2\varphi}{3} \right) \Big|_0^{\pi/2} \right] = \frac{a^2}{4} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{4} \right) = \frac{5\pi a^2}{16}.
\end{aligned}$$

Ответ: Площадь всей области $S = \frac{5\pi a^2}{8}$ (кв.ед.).



Пример 3: С помощью двойного интеграла вычислить массу плоской пластинки, ограниченной линиями $y = x^2$, $y^2 = x$, с заданной плотностью $\gamma(x, y) = x^2 + y$.

Решение: Построим область D (рис.6).

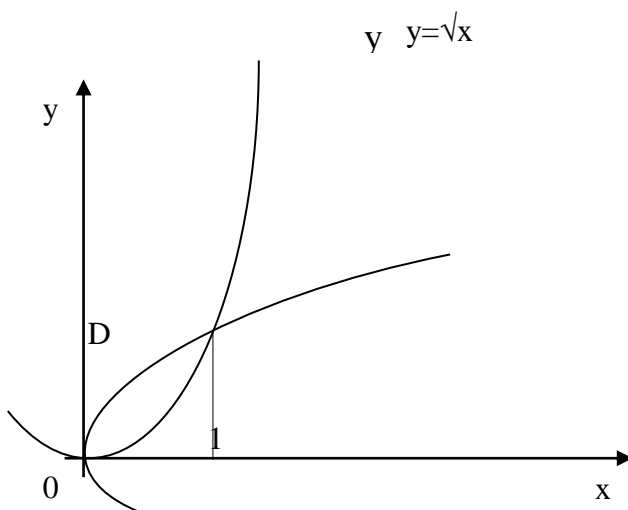


Рис. 5

Эта область ограничена двумя параболой. Проекцией области на ось Ox является отрезок $[0; 1]$. Массу пластинки найдем по формуле (17), вычисляя двойной интеграл по формуле (1):

$$m = \iint_D (x^2 + y) dx dy = \int_0^1 dx \int_{x^2}^{\sqrt{x}} (x^2 + y) dy = \int_0^1 \left(x^2 y + \frac{y^2}{2} \right) \Big|_{x^2}^{\sqrt{x}} dx =$$

$$= \int_0^1 \left(x^{\frac{5}{2}} + \frac{x}{2} - x^4 - \frac{x^4}{2} \right) dx = \left(\frac{2}{7} x^{\frac{7}{2}} + \frac{x^2}{4} - \frac{3}{2} \frac{x^5}{5} \right) \Big|_0^1 = \frac{2}{7} + \frac{1}{4} - \frac{3}{10} = \frac{33}{140}.$$

Ответ: $m = \frac{33}{140}$ ед. массы.



Пример 4. Вычислить массу плоской пластинки, ограниченной линиями

$$x^2 + y^2 = 4x, \quad x^2 + y^2 = 6x, \quad y = 0, \quad y = \sqrt{3}x.$$

$$\text{Поверхностная плотность } \gamma = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Решение: Построим область D . Уравнение $x^2 + y^2 = 4x$ является уравнением окружности $(x - 2)^2 + y^2 = 4$ с центром в точке $(2; 0)$ и радиусом 2 . Уравнение $x^2 + y^2 = 6x$ является уравнением окружности $(x - 3)^2 + y^2 = 9$ с центром в точке $(3; 0)$ и радиусом 3 . Уравнения $y = 0$, $y = \sqrt{3}x$ задают прямые линии (см. рис. 6).

При вычислении массы пластинки по формуле (6) перейдем к полярным координатам (3). Тогда уравнения границ области D примут вид:

$$x^2 + y^2 = 4x \rightarrow \rho^2 = 4\rho \cos \varphi \rightarrow \rho = 4 \cos \varphi,$$

$$x^2 + y^2 = 6x \rightarrow \rho^2 = 6\rho \cos \varphi \rightarrow \rho = 6 \cos \varphi,$$

$$y = 0 \rightarrow \varphi = 0, \quad y = \sqrt{3}x \rightarrow \varphi = \pi/3.$$

Поверхностная плотность в полярных координатах $\gamma = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\rho^2} = \rho$.

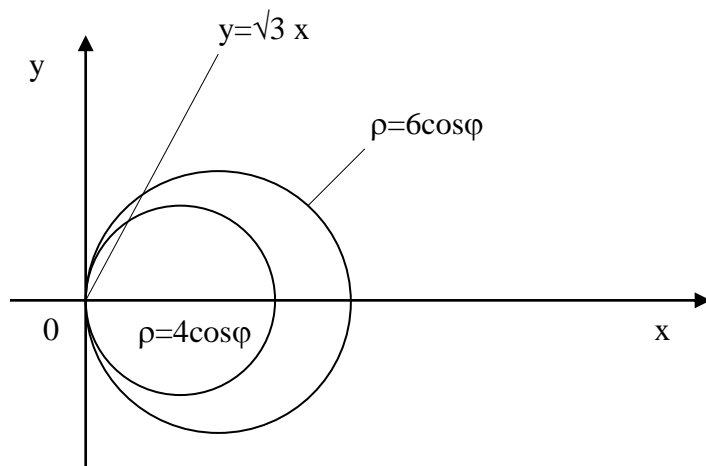


Рис.6

Тогда масса пластинки равна

$$\begin{aligned} m &= \iint_D \gamma(x, y) dx dy = \int_0^{\pi/3} d\varphi \int_{4 \cos \varphi}^{6 \cos \varphi} \rho \cdot \rho d\rho = \int_0^{\pi/3} \left(\frac{\rho^3}{3} \Big|_{4 \cos \varphi}^{6 \cos \varphi} \right) d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi/3} (6^3 \cos^3 \varphi - 4^3 \cos^3 \varphi) d\varphi = \frac{152}{3} \int_0^{\pi/3} \cos^3 \varphi d\varphi = \frac{152}{3} \int_0^{\pi/3} (1 - \sin^2 \varphi) d(\sin \varphi) = \\ &= \frac{152}{3} \left(\sin \varphi - \frac{\sin^3 \varphi}{3} \right) \Big|_0^{\pi/3} = \frac{152}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^3 \right) = 19\sqrt{3}. \end{aligned}$$

Ответ: $19\sqrt{3}$ ед. массы.

Тройной интеграл в прямоугольных координатах

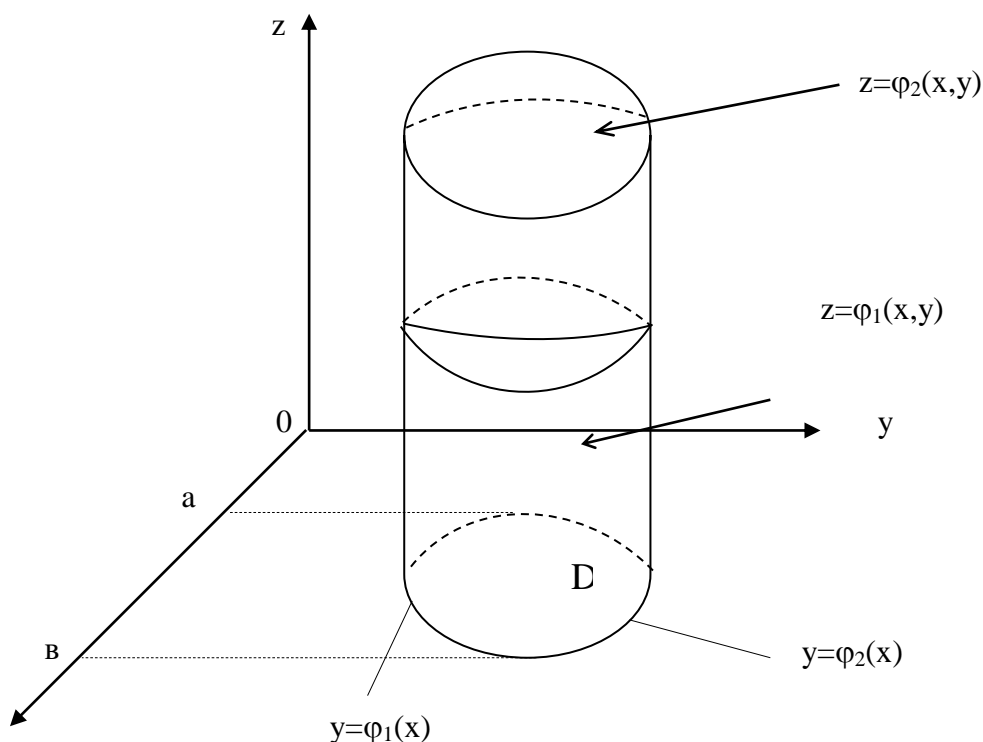
Пусть в области V , заданной в пространстве и ограниченной замкнутой поверхностью S , определена непрерывная функция $f(x, y, z)$. Разобьем область V на n

частичных областей ΔV_i , в каждой области выберем произвольную точку (x_i, y_i, z_i) и составим *интегральную сумму* $\sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i) \Delta V_i$. Предел этих сумм

при неограниченном увеличении числа областей разбиения n и при стремлении к нулю диаметра наибольшей области $\max d_i$ называется *тройным интегралом* от функции $f(x, y, z)$ по области V :

$$\iiint_V f(x, y, z) dV = \lim_{\max d_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i) \Delta V_i.$$

В декартовых координатах элемент объема $dV = dx dy dz$.



x

Рис. 7.

Пусть пространственная область V проектируется в область D на плоскости Oxy и ограничена снизу поверхностью $z = \psi_1(x, y)$, сверху — поверхностью $z = \psi_2(x, y)$, а с боков — цилиндрической поверхностью с образующими, параллельными оси Oz . (см. *рис. 7*). В этом случае тройной интеграл вычисляется по формуле

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \iint_D dx dy \int_{\psi_1(x, y)}^{\psi_2(x, y)} f(x, y, z) dz \quad (7) \text{ или}$$

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \int_a^b dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} dy \int_{\psi_1(x, y)}^{\psi_2(x, y)} f(x, y, z) dz \quad (7')$$

В формулах (18) и (18') возможно изменить порядок интегрирования, проектируя область D в какую-либо другую координатную плоскость.

Тройной интеграл в цилиндрических и сферических координатах

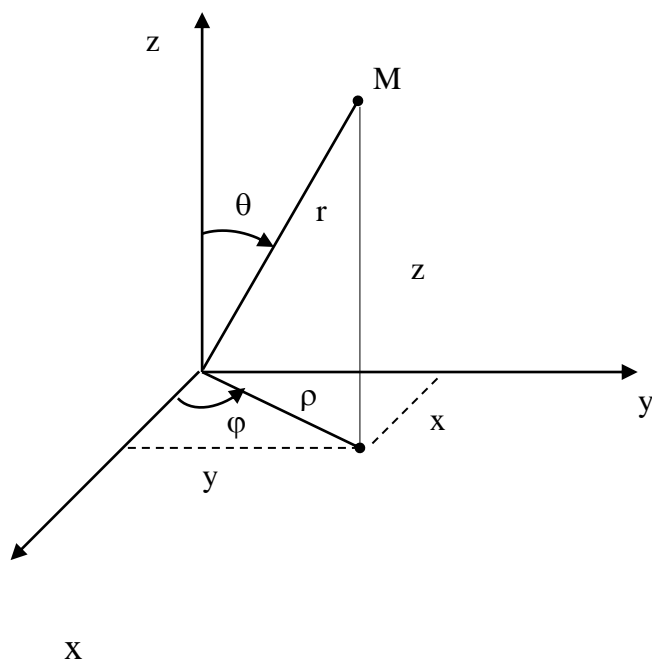


Рис. 8.

Декартовы координаты точки $M(x, y, z)$ связаны с цилиндрическими координатами φ, ρ, z соотношениями:

$$x = \rho \cos \varphi, y = \rho \sin \varphi, z = z, \quad (8)$$

где $0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq \rho \leq +\infty, -\infty \leq z \leq +\infty$, причем $x^2 + y^2 = \rho^2$.

Связь между декартовыми и сферическими координатами φ, θ, ρ точки имеет вид:

$$x = r \cos \varphi \sin \theta, y = r \sin \varphi \cos \theta, z = r \cos \theta, \quad (9)$$

где $0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq r \leq +\infty$, причем $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$.

Переход в тройном интеграле к цилиндрическим координатам осуществляется по формуле:

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{V'} f(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, z) \rho d\rho d\varphi dz, \quad (10)$$

где V' - область изменения цилиндрических координат, соответствующая объему V .

Переход в тройном интеграле к сферическим координатам выполняется по формуле:

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{V'} f(r \cos \varphi \sin \theta, r \sin \varphi \sin \theta, r \cos \theta) r^2 \sin \theta d\varphi d\theta dr, \quad (11) \text{ где } V'$$

- область изменения сферических координат, соответствующая объему V .

Приложения тройного интеграла

Объем пространственного тела V находится по формулам:

в прямоугольных координатах: $V = \iiint_V dx dy dz, \quad (12)$

в цилиндрических координатах: $V = \iiint_V \rho d\rho d\varphi dz \quad (13)$

и в сферических координатах: $V = \iiint_V r^2 \sin \theta dr d\varphi d\theta. \quad (14)$

Масса тела с плотностью $\gamma(x, y, z)$, занимающего пространственную область V , находится по формуле

$$m = \iiint_V \gamma(x, y, z) dx dy dz, \quad (15)$$

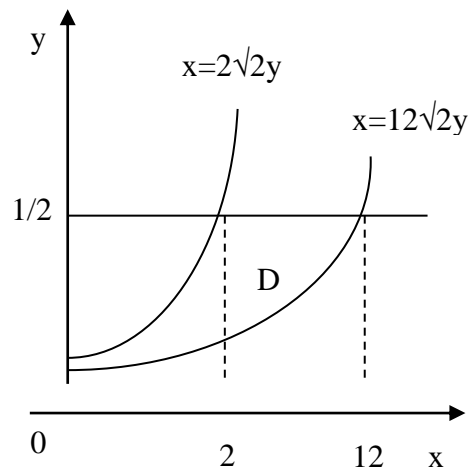
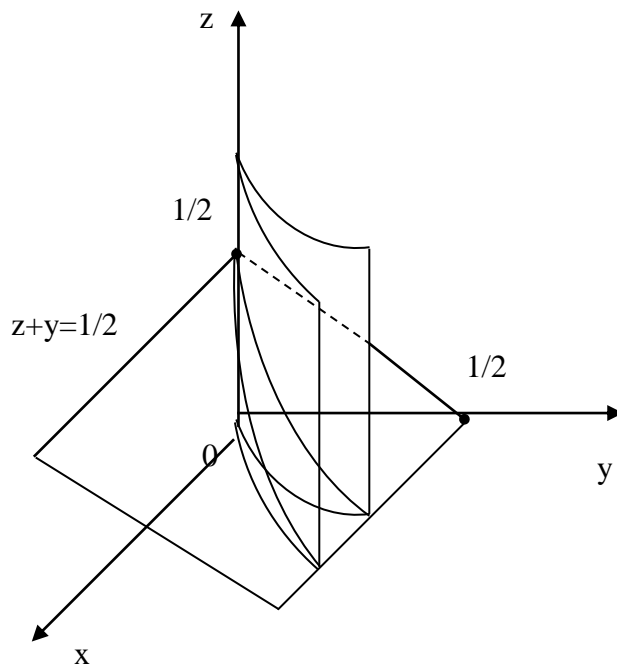
в которой при необходимости можно перейти к цилиндрическим или сферическим координатам в соответствии с (10) и (11).

Пример 5. Вычислить с помощью тройного интеграла объем тела, ограниченного указанными поверхностями: $z = 12\sqrt{2y}$, $z = 2\sqrt{2y}$, $z = 0$, $z + y = 0.5$. Сделать чертеж тела и его проекции в плоскость Oxy .

Решение: Тело ограничено снизу плоскостью Oxy ($z = 0$), сверху — плоскостью $z + y = 0.5$, параллельной оси Oz . Боковая поверхность образована двумя цилиндрическими поверхностями (см. рис. 10).

Объем тела вычисляется по формуле (18):

$$V = \iiint_V dV = \int_0^{0.5} dy \int_{2\sqrt{2y}}^{12\sqrt{2y}} dx \int_0^{0.5-y} dz = \int_0^{0.5} dy \int_{2\sqrt{2y}}^{12\sqrt{2y}} (0.5 - y) dx =$$



$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{0.5} (0.5 - y)(12\sqrt{2y} - 2\sqrt{2y})dy = 10\sqrt{2} \int_0^{0.5} (0.5\sqrt{y} - y\sqrt{y})dy = \\
 &= 10\sqrt{2} \left(0.5 \frac{y^{0.5+1}}{0.5+1} - \frac{y^{1.5+1}}{1.5+1} \right) \Big|_0^{0.5} = 10\sqrt{2} \left(\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{2^3}} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{2^5}} \right) = \frac{2}{3}.
 \end{aligned}$$

Ответ: $V = 2/3$ (ед.³).



Пример 6. Найти объем тела, ограниченного поверхностями $z = \sqrt{9 - x^2 - y^2}$,

$\frac{9}{2}z = x^2 + y^2$. Сделать чертеж тела и его проекции в плоскость Oxy .

Решение: Тело ограничено снизу поверхностью параболоида с вершиной в начале координат ($\frac{9}{2}z = x^2 + y^2$), сверху – полусферой радиусом 3 ($z = \sqrt{9 - x^2 - y^2}$).

Проекцией тела в плоскость Oxy является круг с центром в начале координат, радиус которого можно найти, исключая z из уравнения параболоида. Получим

$$x^2 + y^2 = \frac{27}{4}.$$

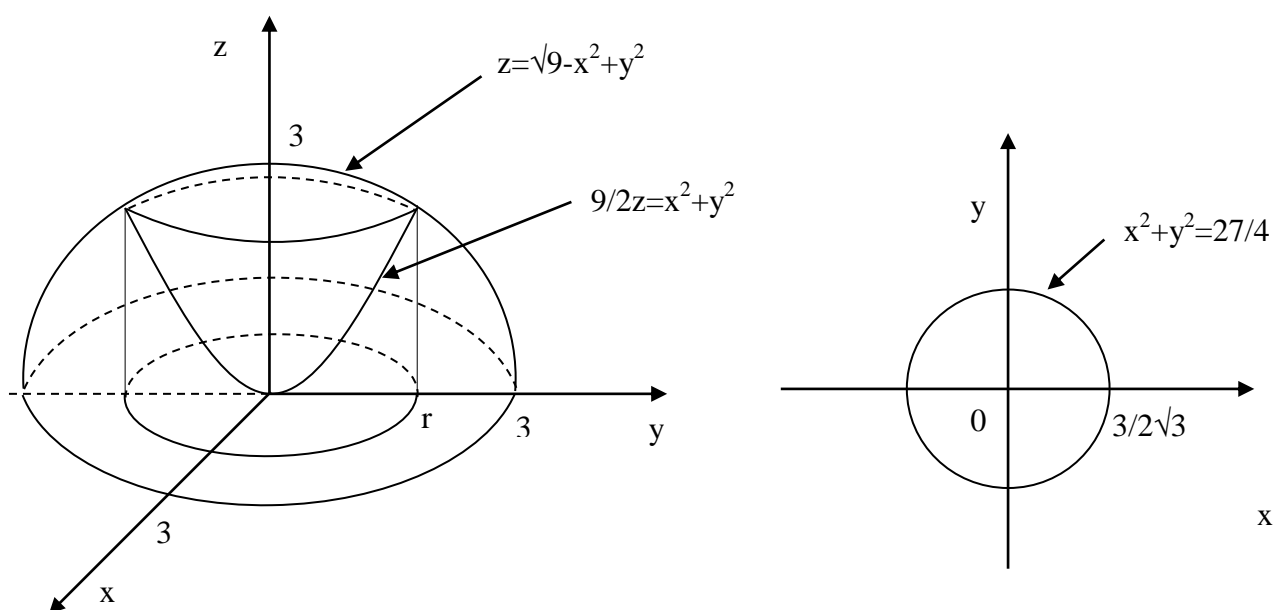


Рис. 10.

Объем тела V удобно вычислить в цилиндрических координатах по формуле (24).

В этом случае уравнение полусферы принимает вид $z = \sqrt{9 - \rho^2}$, а уравнение параболоида $z = \frac{2}{9}\rho^2$. Тогда

$$\begin{aligned}
 V &= \iiint_V dV = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{3}{2}\sqrt{3}} \rho d\rho \int_{\frac{2}{9}\rho^2}^{\sqrt{9-\rho^2}} dz = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{3}{2}\sqrt{3}} \left(\sqrt{9-\rho^2} - \frac{2}{9}\rho^2 \right) \rho d\rho = \\
 &= 2\pi \left[-\frac{1}{2} \frac{(9-\rho^2)^{3/2}}{3/2} - \frac{2}{9} \frac{\rho^4}{4} \right]_0^{\frac{3}{2}\sqrt{3}} = -2\pi \left(\frac{1}{3} \sqrt{\left(9 - \frac{9}{4} \cdot 3\right)^3} + \frac{1}{18} \cdot \frac{81}{16} \cdot 9 - \frac{3^3}{3} \right) = \frac{171}{16} \pi.
 \end{aligned}$$

Ответ: $V = \frac{171}{16} \pi$ (ед.³).

■

Пример 7. Найти объем тела, ограниченного поверхностями $z = \sqrt{36 - x^2 - y^2}$,

$z = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{3}}$. Сделать чертеж тела и его проекции в плоскость Oxy .

Решение:

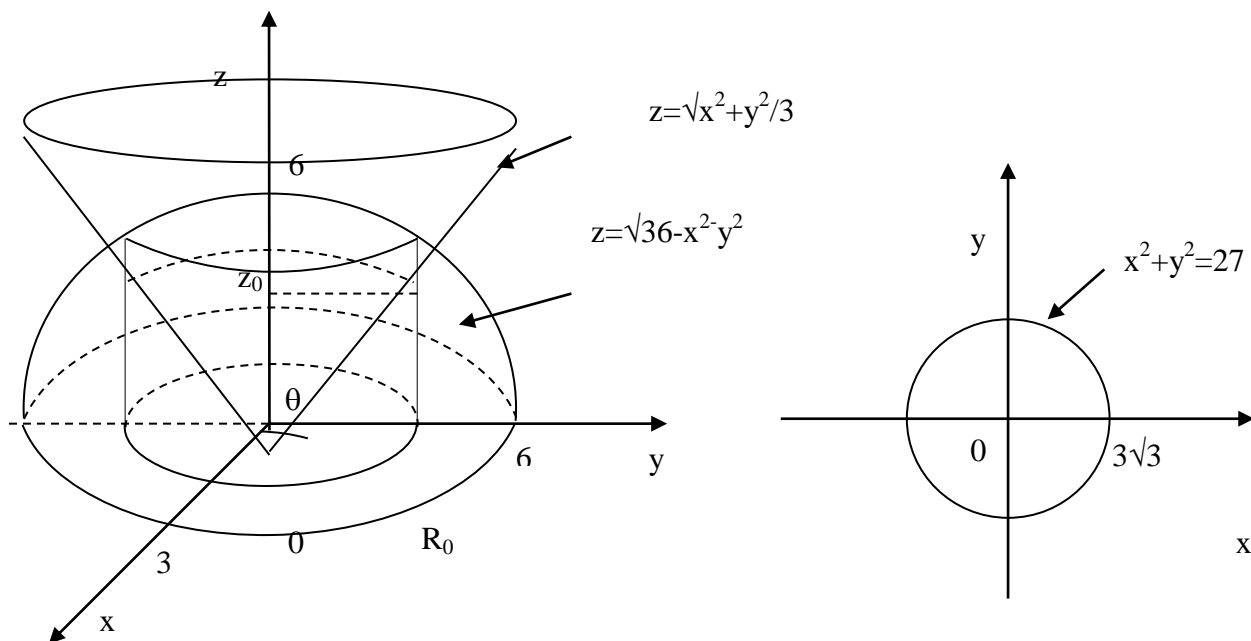


Рис. 11.

Тело ограничено снизу поверхностью конуса $z = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{3}}$, а сверху - поверхностью полусферы $z = \sqrt{36 - x^2 - y^2}$. Проекцией тела в плоскость Oxy является круг с центром в начале координат. Уравнение ограничивающей его окружности получим после исключения из уравнений конуса и полусферы: $\sqrt{\frac{x^2 + y^2}{3}} = \sqrt{36 - x^2 - y^2}$, или после простых преобразований: $x^2 + y^2 = 27$.

Объем тела V удобно вычислять, переходя к сферическим координатам. Запишем в сферических координатах (9) уравнение сферы и конуса: $r = 6$ и $\theta = \theta_0$, где θ_0 - угол при вершине конуса, который найдем из уравнения $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{z_0}{R_0}$ (см. рис.

11). Мы нашли, что $R_0 = 3\sqrt{3}$, тогда $z_0 = \sqrt{\frac{27}{3}} = 3$ (из уравнения конуса).

Следовательно, $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{3}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}$ и $\theta_0 = \frac{\pi}{3}$. Уравнение конуса в сферических координатах: $\theta = \frac{\pi}{3}$.

Тогда объем тела по формуле (14) равен

$$\begin{aligned} V &= \iiint_V dV = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^6 r^2 dr \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin \theta d\theta = \varphi \Big|_0^{2\pi} \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^6 \cdot (-\cos \theta) \Big|_0^{\frac{\pi}{3}} = \\ &= 2\pi \cdot \frac{6^3}{3} \cdot (-\cos \frac{\pi}{3} + \cos 0) = 2\pi \cdot 72 \cdot (-\frac{1}{2} + 1) = 72\pi. \end{aligned}$$

Ответ: $V = 72\pi$ (ед.³).



Пример 8. Найти массу тела, ограниченного поверхностями $x=0$, $y=0$, $z=0$, $x+y+z=1$, если задана его плотность $\gamma(x, y, z) = \frac{1}{(x+y+z+1)^3}$. Сделать чертеж данного тела и его проекции в плоскость Oxy .

Решение: Заданное тело ограничено координатными плоскостями и наклонной плоскостью (см. рис. 12)

Массу тела вычислим по формуле (15):

$$\begin{aligned}
m &= \iiint_V \frac{dV}{(x+y+z)^3} = \int_0^1 dx \int_0^{1-x} dy \int_0^{1-x-y} \frac{dz}{(x+y+z)^3} = \\
&= \int_0^1 dx \int_0^{1-x} \left[\frac{1}{-2(x+y+z+1)^2} \right]_0^{1-x-y} dy = -\frac{1}{2} \int_0^1 dx \int_0^{1-x} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{(x+y+1)^2} \right) dy = \\
&= -\frac{1}{2} \int_0^1 \left[\frac{y}{4} + \frac{1}{x+y+1} \right]_0^{1-x} dx = -\frac{1}{2} \int_0^1 \left(\frac{1-x}{4} + \frac{1}{2} - \frac{1}{1+x} \right) dx = \\
&= -\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{4} \frac{(1-x)^2}{2} + \frac{x}{2} - \ln|1+x| \right) \Big|_0^1 = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - \ln 2 + \frac{1}{8} + \ln 1 \right) = \\
&= -\frac{1}{2} \left(\frac{5}{8} - \ln 2 \right) \approx 0,034.
\end{aligned}$$

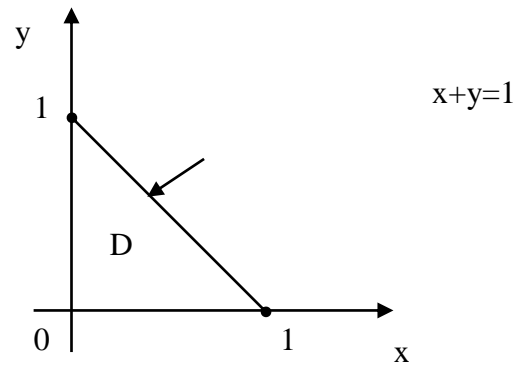
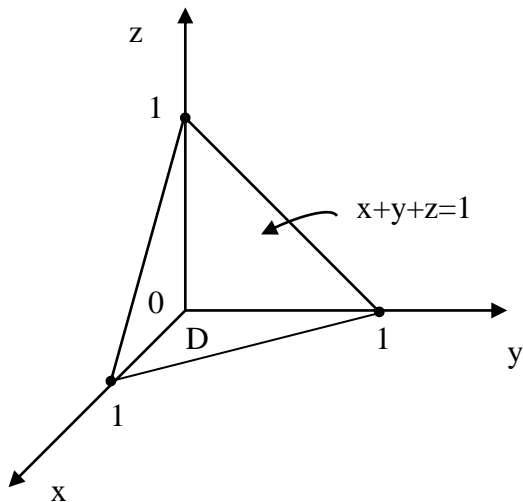
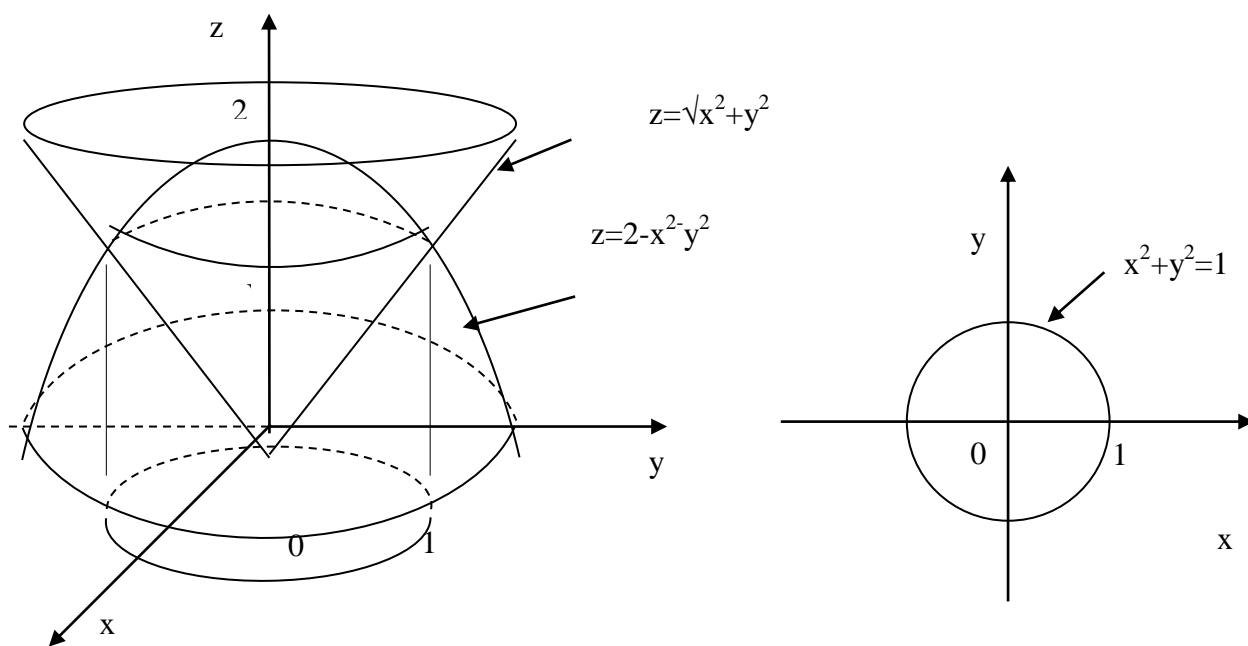


Рис.12

Ответ: $m \approx 0,034$ (ед. массы).

■ **Пример 9.** Найти массу тела с плотностью $\gamma(x, y, z) = x^2 + y^2$, ограниченного поверхностями $z = \sqrt{x^2 + y^2}$, $z = 2 - x^2 - y^2$. Сделать чертеж тела и его проекции в плоскость Oxy .

Решение: Заданное тело ограничено поверхностями конуса $z = \sqrt{x^2 + y^2}$ и параболоида $z = 2 - x^2 - y^2$. Проекцией тела в плоскость Oxy является круг, ограниченный окружностью $x^2 + y^2 = 1$ (см. рис. 13).



Ограничивающие тело поверхности имеют простые уравнения в цилиндрической системе координат (8): конус $z=\rho$, параболоид $z=2-\rho^2$. Массу тела вычислим по формуле (15); записав функцию плотности в цилиндрических координатах: $\gamma=\rho^2$. Тогда

$$\begin{aligned} m &= \iiint_V \gamma dV = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \rho d\rho \int_{\rho}^{2-\rho^2} \rho^2 dz = \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \left[\rho^2 z \right]_{\rho}^{2-\rho^2} \rho d\rho = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \rho^3 (2 - \rho^2 - \rho) d\rho = \\ &= \int_0^{2\pi} \left(2 \frac{\rho^4}{4} - \frac{\rho^5}{5} - \frac{\rho^6}{6} \right) \bigg|_0^1 d\varphi = 2\pi \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{5} - \frac{1}{6} \right) = \frac{4\pi}{15} \end{aligned}$$

Ответ: $m = \frac{4\pi}{15}$ (ед. массы).

Основная литература

1. Кузнецов, Л. А. Сборник заданий по высшей математике. Типовые расчеты : учебное пособие / Л. А. Кузнецов. — 13-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 240 с. — ISBN 978-5-8114-0574-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168472>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : учебник для вузов : в 3 томах / Г. М. Фихтенгольц. — 15-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, [б. г.]. — Том 1 — 2021. — 608 с. — ISBN 978-5-8114-7061-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/154399>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : учебник для вузов : в 3 томах / Г. М. Фихтенгольц. — 15-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, [б. г.]. — Том 2 : Курс дифференциального и интегрального исчисления — 2021. — 800 с. — ISBN 978-5-8114-7377-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/159505>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : учебник для вузов : в 3 томах / Г. М. Фихтенгольц. — 11-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020 — Том 3 — 2020. — 656 с. — ISBN 978-5-8114-6652-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/149365>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.2. Дополнительная литература

1. Аверин, В. В. Математика. Ч. 1 [электронный ресурс] : курс лекций: учебное пособие/ В. В. Аверин, М. Ю. Соколова, Д. В. Христич; ТулГУ. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. - 254 с. : ил.- ISBN 978-5-7679-1748-8. <https://tsutula.bibliotech.ru/Reader/Book/2014100214370663049600009433>, Режим доступа: для авторизованных пользователей.
2. Аверин, В. В. Математика. Ч. 2 [электронный ресурс] : курс лекций: учебное пособие/ В. В. Аверин, М. Ю. Соколова, Д. В. Христич; ТулГУ. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. - 275 с. : ил. -

ISBN 978-5-7679-1749-5 :<https://tsutula.bibliotech.ru/Reader/Book/2014100214412943155100008498>, Режим доступа: для авторизованных пользователей.