

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»  
«11» января 2019 г., протокол № 5

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.В. Глаголев

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

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы специалитета**

по специальности  
**17.05.01 Боеприпасы и взрыватели**

со специализацией  
**Боеприпасы**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 170501-01-19

Тула 2019

## **Разработчик методических указаний**

**Разработчик:**

Соколова М.Ю., проф., д.ф.-м.н., доц.

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Данные методические указания написаны в помощь студентам технических специальностей для практических занятий. Рассмотрены решения типовых задач по аналитической геометрии и линейной алгебре, введению в математический анализ, а также даны необходимые теоретические сведения и ссылки на литературу.

## Аналитическая геометрия в пространстве $R^3$ Векторная алгебра

### Некоторые сведения из теории

Вектор – направленный отрезок.

Равенство

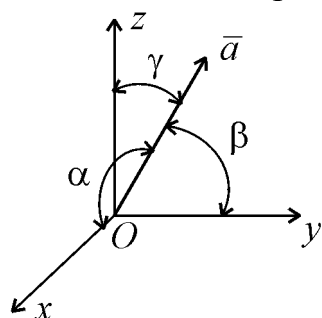
$$\vec{a} = (x, y, z) \quad (1)$$

означает, что  $x, y, z$  – проекции вектора на оси координат или его декартовы координаты.

Формула

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

позволяет по координатам вектора определить его модуль.



Если  $\alpha, \beta, \gamma$  – углы, которые вектор образует с положительным направлением осей координат, то  $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$  называются направляющими косинусами вектора  $\vec{a}$ .

$$x = |\vec{a}| \cos \alpha, \quad y = |\vec{a}| \cos \beta, \quad z = |\vec{a}| \cos \gamma, \quad (3)$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \quad (4)$$

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 находятся по формулам

$$x = x_2 - x_1, \quad y = y_2 - y_1, \quad z = z_2 - z_1. \quad (5)$$

Если  $\vec{a} = (x_1, y_1, z_1)$  и  $\vec{b} = (x_2, y_2, z_2)$ , то

$$\vec{a} \pm \vec{b} = (x_1 \pm x_2, y_1 \pm y_2, z_1 \pm z_2) \quad (6)$$

и  $\alpha \vec{a} = (\alpha x_1, \alpha y_1, \alpha z_1)$ , где  $\alpha$  – любое число.

Векторы, лежащие на одной или параллельных прямых, называются коллинеарными. Признак коллинеарности векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ :

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{z_1}{z_2}. \quad (7)$$

Тройка векторов  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  называется координатным базисом:

$$|\vec{i}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = 1.$$

Векторы  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  направлены по осям соответственно  $Ox, Oy, Oz$  в положительную сторону.

Любой вектор  $\vec{a} = (x, y, z)$  может быть представлен в виде

$$\vec{a} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (8)$$

Скалярным произведением векторов  $\vec{a} = (x_1, y_1, z_1)$  и  $\vec{b} = (x_2, y_2, z_2)$  называется число, равное произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними.

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot n_{p_{\vec{a}}} \vec{b} = |\vec{b}| \cdot n_{p_{\vec{b}}} \vec{a}, \quad (10)$$

$$\vec{a} \cdot \vec{a} = \vec{a}^2 = |\vec{a}|^2, \quad (11)$$

т.е. скалярный квадрат вектора равен квадрату его модуля.

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2. \quad (12)$$

Если  $\vec{a} \perp \vec{b}$ , то

$$x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2 = 0. \quad (13)$$

$$\cos \varphi = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}. \quad (14)$$

Если вектор  $\vec{F}$  изображает силу, точка приложения которой перемещается из начала в конец вектора  $\vec{S}$ , то работа этой силы определяется

$$W = \vec{F} \cdot \vec{S}. \quad (15)$$

Векторным произведением вектора  $\vec{a}$  на  $\vec{b}$  называется такой вектор  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ , который удовлетворяет следующим трем условиям:

1.  $|\vec{c}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между векторами  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ ;
2.  $\vec{c} \perp \vec{a}$  и  $\vec{c} \perp \vec{b}$ ;
3. вектор  $\vec{c}$  образует с векторами  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  «правую» тройку.

Векторное произведение зависит от порядка сомножителей

$$\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}. \quad (16)$$

Модуль векторного произведения равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ :

$$S = |\vec{a} \times \vec{b}|, \quad (17)$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} |\vec{a} \times \vec{b}|. \quad (18)$$

Если векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  коллинеарны, то  $\vec{a} \times \vec{b} = 0$ , в частности,  $\vec{a} \times \vec{a} = 0$ .

Если векторы заданы координатами  $\vec{a} = (x_1, y_1, z_1)$ ,  $\vec{b} = (x_2, y_2, z_2)$ , то

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Если вектор  $\vec{F}$  изображает силу, приложенную в какой-нибудь точке  $M$ , а вектор  $\vec{a}$  идет из некоторой точки  $O$  в точку  $M$ , то вектор  $\vec{a} \times \vec{F}$  представляет собой момент силы  $\vec{F}$  относительно точки  $O$ :

$$m_0 \vec{F} = \vec{a} \times \vec{F}. \quad (20)$$

Смешанным произведением трех векторов  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  называется число, равное векторному произведению  $\vec{a} \times \vec{b}$ , умноженному скалярно на вектор  $\vec{c}$ , т.е.

$$\vec{a}\vec{b}\vec{c} = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}). \quad (21)$$

Смешанное произведение  $\vec{a}\vec{b}\vec{c}$  равно объему параллелепипеда, построенного на векторах  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ , взятому со знаком «плюс», если тройка  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  правая, со знаком «минус», если эта тройка левая.

$$V = \pm \vec{a}\vec{b}\vec{c}. \quad (22)$$

Если векторы компланарны (лежат в одной плоскости), то

$$\vec{a}\vec{b}\vec{c} = 0. \quad (23)$$

Для векторов  $\vec{a} = (x_1, y_1, z_1)$ ,  $\vec{b} = (x_2, y_2, z_2)$ ,  $\vec{c} = (x_3, y_3, z_3)$  смешанное произведение определяется формулой

$$\vec{a}\vec{b}\vec{c} = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Задача 1. На материальную точку действуют силы:

$$\vec{F}_1 = (2, -1, 1), \quad \vec{F}_2 = (-1, 2, 2), \quad \vec{F}_3 = (1, 1, -2).$$

Найти работу равнодействующей этих сил  $\vec{R}$  при перемещении точки из положения  $A(2, -1, 0)$  в положение  $B(4, 1, -1)$ .

Решение. Найдем равнодействующую

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = (2 - 1 + 1, -1 + 2 + 1, 1 + 2 - 2) = (2, 2, 1).$$

Вектор перемещения по формуле (5)

$$\vec{S} = \overrightarrow{AB} = (4 - 2, 1 + 1, -1 - 0) = (2, 2, -1).$$

Искомую работу находим по формуле (15)

$$W = \vec{R} \cdot \vec{S} = 2 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot (-1) = 7.$$

Задача 2. Дана сила  $\vec{F} = (3, 4, -2)$  и точка ее приложения  $A(2, -1, 3)$ . Найти момент силы относительно начала координат и углы, составляемые им с координатными осями.

Решение. По формуле (20)  $m_o \vec{F} = \vec{r} \times \vec{F}$ . Вектор  $\vec{r} = \overrightarrow{OA}$  по формуле (5) имеет координаты  $\vec{r} = (2, -1, 3)$ , по формуле (19)

$$\vec{r} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 2 & -1 & 3 \\ 3 & 4 & -2 \end{vmatrix} = -10\vec{i} + 13\vec{j} + 11\vec{k}.$$

Итак,  $m_o \vec{F} = (-10, 13, 11)$ . Модуль момента находим по формуле (2):

$$|m_o \vec{F}| = \sqrt{(-10)^2 + (13)^2 + (11)^2} = \sqrt{390} \approx 19,748.$$

Направляющие косинусы по формуле (3):

$$\cos \alpha = \frac{-10}{19,748} = -0,506, \quad \cos \beta = \frac{13}{19,748} = 0,658, \quad \cos \gamma = \frac{11}{19,748} = 0,557,$$

а углы, составляемые моментом силы с координатными осями, следующие

$$\alpha = 120^\circ 24', \quad \beta = 48^\circ 51', \quad \gamma = 56^\circ 9'.$$

Контроль: должно быть  $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ . У нас:

$$(-0,506)^2 + (0,658)^2 + (0,557)^2 = 0,999.$$

Задача 3. Написать разложение вектора  $\vec{x} = (5, 16, 2)$  по векторам  $\vec{p} = (2, 1, 0)$ ,  $\vec{q} = (0, -2, 0)$ ,  $\vec{r} = (-1, 5, 2)$ .

Решение.

1. Разложение вектора  $\vec{x}$  по базису  $\vec{p}, \vec{q}, \vec{r}$  имеет вид

$$\vec{x} = \alpha_1 \vec{p} + \alpha_2 \vec{q} + \alpha_3 \vec{r}$$

или в координатной форме

$$\begin{cases} x_1 = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 q_1 + \alpha_3 r_1 \\ x_2 = \alpha_1 p_2 + \alpha_2 q_2 + \alpha_3 r_2 \\ x_3 = \alpha_1 p_3 + \alpha_2 q_3 + \alpha_3 r_3. \end{cases}$$

2. С учетом числовых значений координат векторов  $\vec{p}, \vec{q}, \vec{r}$  и  $\vec{x}$  получим систему уравнений относительно неизвестных  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ :

$$\begin{cases} 2 \cdot \alpha_1 + 0 \cdot \alpha_2 - 1 \cdot \alpha_3 = 5 \\ 1 \cdot \alpha_1 - 2 \cdot \alpha_2 + 5 \cdot \alpha_3 = 16 \\ 0 \cdot \alpha_1 + 0 \cdot \alpha_2 + 2 \alpha_3 = 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2\alpha_1 = 5 + \alpha_3 \\ 2\alpha_2 = \alpha_1 + 5\alpha_3 - 16 \\ \alpha_3 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_1 = 3 \\ \alpha_2 = -4 \\ \alpha_3 = 1. \end{cases}$$

3. Разложение вектора  $\vec{x}$  по векторам  $\vec{p}, \vec{q}, \vec{r}$  имеет вид:

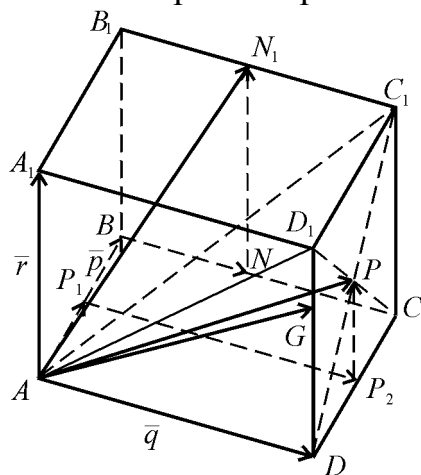
$$\vec{x} = 3\vec{p} - 4\vec{q} + \vec{r}.$$

Ответ:  $\vec{x} = 3\vec{p} - 4\vec{q} + \vec{r}$ .

Задача 4. В параллелепипеде  $ABCD A_1 B_1 C_1 D_1$  векторы  $\overrightarrow{AB} = \vec{p}$ ,  $\overrightarrow{AD} = \vec{q}$ ,  $\overrightarrow{AA_1} = \vec{r}$  образуют базис. Разложить векторы  $\overrightarrow{AG}$ ,  $\overrightarrow{AP}$ ,  $\overrightarrow{AN_1}$  по выбранному базису, если точка  $G$  делит ребро  $DD_1$  в отношении 1:2; точка  $P$  – точка пересечения диагоналей грани  $DD_1 C_1 C$ ; точка  $N_1$  – середина ребра  $B_1 C_1$ .

Решение.

Построим чертеж. Непосредственно из чертежа следует:



$$\overrightarrow{AG} = \overrightarrow{AD} + \overrightarrow{DG} = \vec{q} + \frac{2}{3}\vec{r},$$

$$\overrightarrow{AP} = \overrightarrow{AP_1} + \overrightarrow{AP_2} + \overrightarrow{P_2P} = \frac{1}{2}\vec{p} + \vec{q} + \frac{1}{2}\vec{r},$$

$$\overrightarrow{AN_1} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BN} + \overrightarrow{NN_1} = \vec{p} + \frac{1}{2}\vec{q} + \vec{r}.$$

Ответ:  $\overrightarrow{AG} = \vec{q} + \frac{2}{3}\vec{r}$ ,  $\overrightarrow{AP} = \frac{1}{2}\vec{p} + \vec{q} + \frac{1}{2}\vec{r}$ ,

$$\overrightarrow{AN_1} = \vec{p} + \frac{1}{2}\vec{q} + \vec{r}.$$

### **Прямая и плоскость** **Плоскость. Ее уравнения**

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad - \quad (25)$$

общее уравнение плоскости.

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0 \quad - \quad (26)$$

уравнение плоскости, проходящей через точку  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  перпендикулярно вектору  $\vec{n} = (A, B, C)$ .

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1 \quad - \quad (27)$$

уравнение плоскости «в отрезках». Здесь  $a, b, c$  – величины отрезков, отсекаемых плоскостью на осях координат.

$$\frac{Ax + By + Cz + D}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0 \quad - \quad (28)$$

нормальное уравнение плоскости.

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad - \quad (29)$$

расстояние от точки  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  до плоскости  $Ax + By + Cz + D = 0$ .

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad - \quad (30)$$

уравнение плоскости, проходящей через три точки  $A_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $A_3(x_3, y_3, z_3)$ .

### Прямая. Ее уравнения

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \end{cases} \quad - \quad (31)$$

общее уравнение прямой (прямая задана пересечением двух плоскостей).

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p} \quad - \quad (32)$$

каноническое уравнение прямой, где  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  – точка, принадлежащая прямой,  $\vec{a} = (m, n, p)$  – направляющий вектор прямой (вектор, параллельный прямой).

$$\begin{cases} x = x_0 + mt \\ y = y_0 + nt \\ z = z_0 + pt \end{cases} \quad - \quad (33)$$

параметрические уравнения прямой.

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad - \quad (34)$$

уравнение прямой, проходящей через две данные точки  $A_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2, z_2)$ .

$$\cos \varphi = \frac{m_1m_2 + n_1n_2 + p_1p_2}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2} \cdot \sqrt{m_2^2 + n_2^2 + p_2^2}} \quad - \quad (35)$$

угол между двумя прямыми, где  $\vec{a}_1 = (m_1, n_1, p_1)$  и  $\vec{a}_2 = (m_2, n_2, p_2)$  – направляющие векторы прямых.

$$\sin \psi = \frac{|Am + Bn + Cp|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \cdot \sqrt{m^2 + n^2 + c^2}} - \quad (36)$$

угол между прямой и плоскостью, где  $\vec{n} = (A, B, C)$  – нормальный вектор плоскости,  $\vec{a} = (m, n, p)$  – направляющий вектор прямой.

$$V_{\text{пирамиды}} = \frac{1}{6} \left| \begin{array}{ccc} \overrightarrow{A_1 A_2} & \overrightarrow{A_1 A_3} & \overrightarrow{A_1 A_4} \end{array} \right| - \text{объем пирамиды } A_1 A_2 A_3 A_4,$$

где  $A_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $A_3(x_3, y_3, z_3)$ ,  $A_4(x_4, y_4, z_4)$  – координаты вершин пирамиды.

$$V_{\text{пирамиды}} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix}. \quad (37)$$

- Задача 5. Даны координаты вершин пирамиды  $A_1(2, 1, -1)$ ,  $A_2(3, 0, 1)$ ,  $A_3(2, -1, 3)$ ,  $A_4(0, 8, 0)$ . Найти:
- 1) угол между ребрами  $A_1 A_2$  и  $A_1 A_4$ ;
  - 2) угол между ребром  $A_1 A_4$  и гранью  $A_1 A_2 A_3$ ;
  - 3) объем пирамиды  $V$ ;
  - 4) расстояние от точки  $A_4$  до плоскости  $A_1 A_2 A_3$ ;
  - 5) точку  $A'_4$ , симметричную точке  $A_4$  относительно плоскости  $A_1 A_2 A_3$ ;
  - 6) точку  $A''_4$ , симметричную точке  $A_4$  относительно прямой  $A_1 A_3$ .

Решение.

- 1) Угол между ребрами находим по формуле (35).

$\vec{a}_1 = \overrightarrow{A_1 A_2} = (3 - 2, 0 - 1, 1 - (-1)) = (1, -1, 2)$  – направляющий вектор прямой  $A_1 A_2$ ;

$\vec{a}_2 = \overrightarrow{A_1 A_4} = (0 - 2, 8 - 1, 0 - (-1)) = (-2, 7, 1)$  – направляющий вектор прямой  $A_1 A_4$ .

$$\cos \varphi = \frac{1 \cdot (-2) - 1 \cdot 7 + 2 \cdot 1}{\sqrt{1^2 + (-1)^2 + 2^2} \cdot \sqrt{(-2)^2 + 7^2 + 1^2}} = \frac{-7}{\sqrt{6} \cdot \sqrt{54}} = -\frac{7}{18}.$$

- 2) Составим уравнение плоскости  $A_1 A_2 A_3$ , проходящей через три точки  $A_1(2, 1, -1)$ ,  $A_2(3, 0, 1)$ ,  $A_3(2, -1, 3)$ , по формуле (30)

$$\begin{vmatrix} x - 2 & y - 1 & z + 1 \\ 3 - 2 & 0 - 1 & 1 + 1 \\ 2 - 2 & -1 - 1 & 3 + 1 \end{vmatrix} = 0, \quad \begin{vmatrix} x - 2 & y - 1 & z + 1 \\ 1 & -2 & 2 \\ 0 & -2 & 4 \end{vmatrix} = 0,$$

$$(x-2)\begin{vmatrix} -1 & 2 \\ -2 & 4 \end{vmatrix} - (y-1)\begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 4 \end{vmatrix} + (z+1)\begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} = 0,$$

$$(x-2) \cdot 0 - (y-1) \cdot 4 + (z+1) \cdot (-2) = 0, \\ -4y + 4 - 2z - 2 = 0,$$

$4y + 2z - 2 = 0$  – уравнение плоскости  $A_1 A_2 A_3$ ;

$\vec{n} = (0, 2, 1)$  – нормальный вектор плоскости;

$\vec{a} = \overrightarrow{A_1 A_4} = (-2, 7, 1)$  – направляющий вектор прямой  $A_1 A_4$ .

Находим угол  $\psi$  между прямой  $A_1 A_4$  и плоскостью  $A_1 A_2 A_3$  по формуле (36)

$$\sin \psi = \frac{0 \cdot (-2) + 2 \cdot 7 + 1 \cdot 1}{\sqrt{0^2 + 2^2 + 1^2} \cdot \sqrt{(-2)^2 + 7^2 + 1^2}} = \frac{15}{\sqrt{5} \cdot \sqrt{54}} = 0,9114.$$

3) Находим объем пирамиды по формуле (37)

$$\overrightarrow{A_1 A_2} = (1, -1, 2); \quad \overrightarrow{A_1 A_3} = (0, -2, 4); \quad \overrightarrow{A_1 A_4} = (-2, 7, 1).$$

$$V = \pm \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & -2 & 4 \\ -2 & 7 & 1 \end{vmatrix} = \pm \frac{1}{6} (-2 + 8 - 8 - 28) = -\frac{1}{6} (-30) = 15.$$

4) Расстояние от точки  $A_4$  до плоскости  $A_1 A_2 A_3$  находим по формуле (29).

$$d = \frac{|2 \cdot 8 + 0 - 1|}{\sqrt{4 + 1}} = \frac{15}{\sqrt{5}} = 3\sqrt{5} \approx 6,69.$$

5) Чтобы найти точку  $A'_4$ , симметричную точке  $A_4$  относительно плоскости  $A_1 A_2 A_3$ , сделаем следующее.

Составим уравнение прямой, перпендикулярной плоскости  $A_1 A_2 A_3$ , проходящей через точку  $A_4$  по формуле (32). За направляющий вектор прямой  $\vec{a} = \vec{n} = (0, 2, 1)$  берем нормальный вектор плоскости, т.к. прямая перпендикулярна плоскости:

$$\frac{x-0}{0} = \frac{y-8}{2} = \frac{z-0}{1}, \quad \frac{x}{0} = \frac{y-8}{2} = \frac{z}{1}.$$

Составим параметрические уравнения этой прямой по формуле (33):

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 2t + 8 \\ z = t. \end{cases}$$

Находим точку пересечения этой прямой с плоскостью  $A_1 A_2 A_3$

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 2t + 8 \\ z = t \\ 2y + z - 1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ y = -6 + 8 = 2 \\ z = t \end{cases} \Rightarrow 2(2t + 8) + t - 1 = 0,$$

$$5t + 15 = 0, \quad t = -3.$$

Получаем точку  $M(0, 2, -3)$ ; т.к. точка  $A'_4$  симметрична точке  $A_4$  относительно плоскости  $A_1 A_2 A_3$ , то точка  $M$  является серединой отрезка  $A_4 A'_4$ , поэтому

$$\begin{aligned} x_M &= \frac{x_4 + x'_4}{2}, & 0 &= \frac{0 + x'_4}{2}, & x'_4 &= 0; \\ y_M &= \frac{y_4 + y'_4}{2}, & 2 &= \frac{8 + y'_4}{2}, & y'_4 &= -4; \\ z_M &= \frac{z_4 + z'_4}{2}, & -3 &= \frac{0 + z'_4}{2}, & z'_4 &= -6. \end{aligned}$$

$$A'_4(0, -4, -6).$$

б) Чтобы найти точку  $A''_4$ , симметричную точке  $A_4$  относительно прямой  $A_1 A_3$ , составим уравнение плоскости, проходящей через точку  $A_4$  перпендикулярно прямой  $A_1 A_3$  по формуле (26). За нормальный вектор плоскости  $\vec{n} = \vec{a} = (0, -2, 4)$  берем направляющий вектор прямой  $A_1 A_3$ , т.к. плоскость перпендикулярна прямой.

$$0 \cdot (x - 0) - 2 \cdot (y - 3) + 4 \cdot (z - 0) = 0, \quad -2y + 16 + 4z = 0, \quad y = 2z - 8 = 0.$$

Уравнение прямой  $A_1 A_3$  составляем по формуле (34).

$$\frac{x - 2}{2 - 2} = \frac{y - 1}{-1 - 1} = \frac{z + 1}{3 + 1}, \quad \frac{x - 2}{0} = \frac{y - 1}{-2} = \frac{z + 1}{4}.$$

Параметрические уравнения прямой  $A_1 A_3$ :

$$\begin{cases} x = 2 \\ y = -2t + 1 \\ z = 4t - 1. \end{cases}$$

Находим точку  $N$  пересечения прямой  $A_1 A_3$  и плоскости:

$$\begin{cases} x = 2 \\ y = -2t + 1 \\ z = 4t - 1 \\ y - 2z - 8 = 0, \end{cases}$$

$$-2t + 1 - 2(4t - 1) - 8 = 0, \quad -10t - 5 = 0, \quad t = -\frac{1}{2},$$

$$x = 2, \quad y = -2\left(-\frac{1}{2}\right) + 1 = 2, \quad z = 4\left(-\frac{1}{2}\right) - 1 = -3.$$

Итак, точка  $N(2, 2, -3)$ . Так как точка  $A_4''$  симметрична точке  $A_4$  относительно прямой  $A_1A_3$ , то точка  $N$  является серединой отрезка  $A_4A_4''$ , тогда

$$\begin{aligned} x_N &= \frac{x_4 + x_4''}{2}, & 2 &= \frac{0 + x_4''}{2}, & x_4'' &= 4, \\ y_N &= \frac{y_4 + y_4''}{2}, & 2 &= \frac{8 + y_4''}{2}, & y_4'' &= -4, \\ z_N &= \frac{z_4 + z_4''}{2}, & -3 &= \frac{0 + z_4''}{2}, & z_4'' &= -6, \end{aligned} \quad \text{точка } A_4''(4, -4, -6).$$

### **Аналитическая геометрия на плоскости**

Некоторые сведения из теории

#### **Прямая линия. Ее уравнение**

$$Ax + By + C = 0 \quad - \quad (38)$$

общее уравнение прямой.

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} \quad - \quad (39)$$

уравнение прямой, проходящей через точку  $M_0(x_0, y_0)$ ,  $\vec{a} = (m, n)$  – вектор, параллельный прямой.

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) = 0 \quad - \quad (40)$$

уравнение прямой, проходящей через точку  $M_0(x_0, y_0)$  с перпендикулярным вектором  $\vec{n} = (A, B)$ .

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad - \quad (41)$$

уравнение прямой проходящей через две точки  $M_1(x_1, y_1)$  и  $M_2(x_2, y_2)$ .

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1 \quad - \quad (42)$$

уравнение прямой в «отрезках», где  $a, b$  – величины отрезков, отсекаемых прямой на осях координат.

$$y = kx + b \quad - \quad (43)$$

уравнение прямой с угловым коэффициентом  $k = \operatorname{tg} \varphi$  и отрезком  $b$  – отсекаемым на оси  $Oy$ .

$$y - y_0 = k(x - x_0) - \quad (44)$$

уравнение прямой, проходящей через точку  $M_0(x_0, y_0)$  с угловым коэффициентом  $k$ .

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} - \quad (45)$$

расстояние от точки  $M_0(x_0, y_0)$  до прямой  $Ax + By + C = 0$ .

$$\delta = \frac{Ax_0 + By_0 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} - \quad (45a)$$

отклонение точки  $M_0(x_0, y_0)$  от прямой.

$$k = -\frac{A}{B} - \quad (46)$$

угловой коэффициент прямой  $Ax + By + C = 0$ .

$$k_1 = k_2 - \quad (47)$$

условие параллельности прямых.

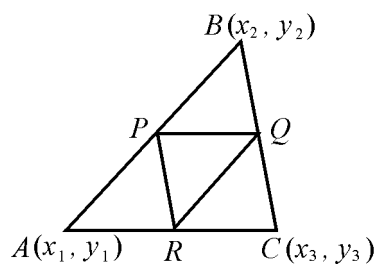
$$k_1 = -\frac{1}{k_2} - \quad (48)$$

условие перпендикулярности прямых.

$$\operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 k_2} \right| - \quad (49)$$

угол между двумя прямыми с угловыми коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$ .

**Задача 6.** Даны середины сторон треугольника  $P(1, 2)$ ,  $Q(5, 1)$ ,  $R(-4, 3)$ . Составить уравнения его сторон.



1 способ. Так как точки  $P, Q, R$  являются серединами отрезков  $AB, AC, BC$ , то

$$\frac{x_1 + x_2}{2} = 1, \quad \frac{x_2 + x_3}{2} = 5, \quad \frac{x_1 + x_3}{2} = -4,$$

$$\frac{y_1 + y_2}{2} = 2, \quad \frac{y_2 + y_3}{2} = -1, \quad \frac{y_1 + y_3}{2} = 3.$$

Решаем две системы уравнений

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 2 \\ x_2 + x_3 = 10 \\ x_1 + x_3 = -8, \end{cases} \quad \begin{cases} y_1 + y_2 = 4 \\ y_2 + y_3 = -2 \\ y_1 + y_3 = 6, \end{cases}$$

получаем

$$\begin{array}{ll} x_1 = -8 & y_1 = 6 \\ x_2 = 0 & y_2 = 0 \\ x_3 = 10, & y_3 = -2, \end{array} \quad A(-8, 6), \quad B(10, -2), \quad C(0, 0).$$

Теперь составляем уравнения сторон треугольника, как прямых, проходящих через две точки, по формуле (41).

Уравнение  $AB$ :

$$\frac{x+8}{10+8} = \frac{y-6}{-2-6}, \quad 4x+9y-22=0.$$

Уравнение  $BC$ :

$$\frac{x-10}{0-10} = \frac{y+2}{0+2}, \quad x+5y=0.$$

Уравнение  $AC$ :

$$\frac{x+8}{0+8} = \frac{y-6}{0-6}, \quad 3x+4y=0.$$

2 способ. Не определяя координат точек  $A, B, C$ , составим уравнение каждой из сторон треугольника  $ABC$ , как прямой, проходящей через одну из вершин треугольника  $PQR$  параллельно противоположной стороне.

Уравнение  $AB$ : прямая  $AB$  проходит через точку  $P$  параллельно век-

тору  $\overrightarrow{QR} = (-9, 4)$ . Используем уравнение (39).

$$\frac{x-1}{-9} = \frac{y-2}{4} \Rightarrow 4x+9y-22=0.$$

Уравнение  $BC$ : прямая  $BC$  проходит через точку  $Q$  параллельно век-

тору  $\overrightarrow{PR} = (-5, 1)$ .

$$\frac{x-5}{-5} = \frac{y+1}{1} \Rightarrow x+5y=0.$$

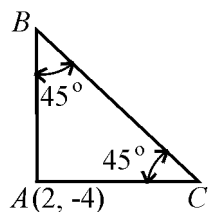
Уравнение  $AC$ : прямая  $AC$  проходит через точку  $R$  параллельно век-

тору  $\overrightarrow{PQ} = (4, -3)$ .

$$\frac{x+4}{4} = \frac{y-3}{-3} \Rightarrow 3x+4y=0.$$

Ответ:  $4x+9y-22=0$ ,  $x+5y=0$ ,  $3x+4y=0$ .

Задача 7. Составить уравнения катетов прямоугольного равнобедренного треугольника, зная уравнение гипотенузы  $2x+3y-5=0$  и вершину прямого угла  $(2, -1)$ .



$AB = BC$  (по условию), поэтому  $\angle ABC = \angle ACB = 45^\circ$ ,

$k_{BC} = -\frac{2}{3}$  (по формуле (46)). Уравнения катетов  $AB$  и

$BC$  составляем по формуле (44):  $y+1=k(x-2)$ .

$$\operatorname{tg} 45^{\circ} = \left| \frac{k + \frac{2}{3}}{1 - \frac{2}{3}k} \right|, \quad (49)$$

$$\frac{k + \frac{2}{3}}{1 - \frac{2}{3}k} = \pm 1.$$

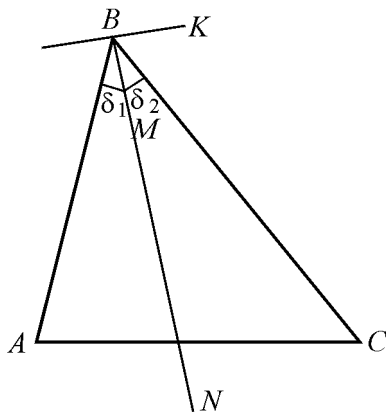
Решая эти уравнения, получим:

$$k = \frac{1}{5}, \quad y + 1 = \frac{1}{5}(x - 2), \quad 5y + 5 = x - 2, \quad x - 5y - 7 = 0.$$

$$k = -5, \quad y + 1 = -5(x - 2), \quad y + 1 = -5x + 10, \quad 5x + y - 9 = 0.$$

Ответ:  $x - 5y - 7 = 0$ ,  $5x + y - 9 = 0$ .

**Задача 8.** В треугольнике с вершинами  $A(3, -2)$ ,  $B(-1, 1)$ ,  $C(5, -7)$  найти биссектрису внутреннего угла  $\angle ABC$ .



1) Составим уравнения сторон угла  $\angle ABC$ , воспользовавшись формулой (41).

Сторона  $BA$ :

$$\frac{x + 1}{3 + 1} = \frac{y - 1}{-2 - 1}, \quad -3x - 4y + 1 = 0.$$

Сторона  $BC$ :

$$\frac{x + 1}{5 + 1} = \frac{y - 1}{-4 - 1}, \quad -8x - 6y - 2 = 0.$$

2) Точки биссектрисы равноудалены от сторон угла. Приравняем расстояния от произвольной точки биссектрисы  $M(x, y)$  до сторон угла  $BA$  и  $BC$ , вычисляя их по формуле (45).

$$\frac{|-3x - 4y + 1|}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = \frac{|-8x - 6y - 2|}{\sqrt{8^2 + 6^2}}, \quad \frac{|-3x - 4y + 1|}{5} = \frac{|-8x - 6y - 2|}{10}.$$

Из последнего равенства получаем следующие два:

$$2(-3x - 4y + 1) = -8x - 6y - 2 \quad \text{и} \quad 2(-3x - 4y + 1) = -(-8x - 6y - 2).$$

После преобразования получаем уравнения двух прямых, которые являются биссектрисами внутреннего и внешнего углов при вершине  $B$  треугольника  $ABC$ :

$$x - y + 3 = 0 \quad (a)$$

и

$$x + y = 0. \quad (б)$$

Для биссектрисы внутреннего угла треугольника  $BN$  отклонения вершин треугольника  $A$  и  $C$  имеют разные знаки, а для биссектрисы внешнего угла  $BK$  — знаки отклонений одинаковы.

Найдем отклонения точек  $A$  и  $C$  от прямой (а) по формуле (40,а):

$$\delta_A = \frac{3 - (-2) + 2}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{7}{\sqrt{2}} > 0, \quad \delta_C = \frac{5 - (-7) + 2}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{14}{\sqrt{2}} > 0,$$

следовательно, уравнение (а) – это уравнение прямой  $BK$ . Тогда уравнение биссектрисы внутреннего угла треугольника  $ABC$  при вершине  $B$ :

$$x + y = 0.$$

Ответ:  $x + y = 0$ .

### Линии второго порядка

Окружность. Уравнение

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (50)$$

определяет окружность радиуса  $R$  с центром  $C(a, b)$ . Если центр окружности совпадает с началом координат, т.е.  $a = b = 0$ , то уравнение окружности примет вид

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad (51)$$

Общее алгебраическое уравнение второй степени

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0$$

есть уравнение окружности, если  $A = C \neq 0$ ,  $B = 0$ , т.е.

$$Ax^2 + Ay^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0. \quad (52)$$

Эллипс.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 - \quad (53)$$

уравнение эллипса (канонический вид).

$$b^2 = a^2 - c^2, \quad a > b. \quad (54)$$

В этом случае фокусы эллипса имеют координаты

$$F_1(-c, 0) \text{ и } F_2(c, 0). \quad (55)$$

Начало координат  $O$  – центр симметрии эллипса, а оси координат – оси симметрии эллипса. Точки  $A_1(-a, 0)$ ,  $A_2(a, 0)$ ,  $B_1(0, -b)$ ,  $B_2(0, b)$  называются вершинами эллипса,  $a$  и  $b$  – большая и малая полуоси. Величина

$$\varepsilon = \frac{c}{a} < 1 \quad (56)$$

называется эксцентриситетом эллипса. Эксцентриситет характеризует вытянутость эллипса, т.к. выражается через отношение его полуосей

$$\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}. \quad (57)$$

Окружность можно считать частным случаем эллипса, у которого  $a = b$ , т.е.  $\varepsilon = 0$ .

$$x = \pm \frac{a}{\varepsilon} - \quad (58)$$

уравнения директрис.

Если фокусы эллипса расположены на оси  $Oy$ , то уравнение эллипса имеет тот же вид (58), но  $b > a$ . Фокусы имеют координаты:

$F_1(0, -c)$  и  $F_2(0, c)$ . Уравнения директрис

$$y = \pm \frac{b}{\varepsilon}. \quad (59)$$

### Гипербола.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 - \quad (60)$$

каноническое уравнение гиперболы.

$$b^2 = c^2 - a^2, \quad a < c. \quad (61)$$

Фокусы имеют координаты  $F_1(-c, 0)$  и  $F_2(c, 0)$ . Оси координат являются осями симметрии гиперболы, а точка  $O$  – центр симметрии. Гипербола пересекает ось абсцисс в точках  $A_1(-a, 0)$ ,  $A_2(a, 0)$ , которые называются ее действительными вершинами, а величина  $a$  – действительной полуосью гиперболы. Точки  $B_1(0, -b)$  и  $B_2(0, b)$  называются мнимыми вершинами, а  $b$  – мнимая полуось. Прямоугольник с центром в начале координат и со сторонами, параллельными координатным осям и проходящими через вершины гиперболы, называется основным прямоугольником гиперболы. Его диагонали

$$y = \pm \frac{b}{a}x \quad (62)$$

являются асимптотами гиперболы, т.е. прямыми, к которым неограниченно приближаются ветви гиперболы.

Эксцентриситет гиперболы

$$\varepsilon = \frac{c}{a} > 1. \quad (63)$$

$$\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a} = \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}. \quad (64)$$

Если  $a = b$ , гипербола называется равносторонней. В этом случае основной прямоугольник превращается в квадрат, а эксцентриситет равен  $\sqrt{2}$ .

$$x = \pm \frac{a}{\varepsilon} - \quad (65)$$

директрисы гиперболы.

Если уравнение гиперболы имеет вид

$$-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (66)$$

то асимптоты гиперболы:

$$x = \pm \frac{b}{a} y, \quad (67)$$

фокусы  $F_1(0, -c)$ ,  $F_2(0, c)$ .

$$y = \pm \frac{b}{\varepsilon} - \quad (68)$$

уравнения директрис.

Парабола.

Каноническое уравнение параболы

$$y^2 = 2px \quad (p > 0), \quad (69)$$

где  $p$  – расстояние от фокуса до директрисы. Уравнение директрисы

$x = -\frac{p}{2}$ , координаты фокуса  $F\left(\frac{p}{2}, 0\right)$ . Начало координат является вершиной параболы, а ось абсцисс – ее осью симметрии. Эксцентриситет параболы  $\varepsilon = 1$ .

В ряде случаев рассматривают параболы:

$$\text{а) } y^2 = -2px, \quad F\left(-\frac{p}{2}, 0\right) - \text{фокус, } x = \frac{p}{2} - \text{уравнение директрисы;} \quad (70)$$

$$\text{б) } x^2 = 2py, \quad F\left(0, \frac{p}{2}\right) - \text{фокус, } y = -\frac{p}{2} - \text{уравнение директрисы;} \quad (71)$$

$$\text{в) } x^2 = -2py, \quad F\left(0, -\frac{p}{2}\right) - \text{фокус, } y = \frac{p}{2} - \text{уравнение директрисы.} \quad (72)$$

Для всех случаев  $p > 0$ .

Задача 9. Среди прямых параллельных прямой  $2x + y = 0$ , выделить касательные к окружности  $x^2 + y^2 = 1$ .

Решение. Уравнение всякой прямой, параллельной данной, можно записать в виде

$$2x + y + c = 0.$$

Касательная к окружности имеет с ней только одну общую точку, поэтому совместное решение уравнений прямой и окружности должно иметь только один ответ.

Из уравнения прямой  $y = -2x - c$ .

$$\begin{cases} y = -2x - c \\ x^2 + y^2 = 1, \quad x^2 + (-2x - c)^2 = 1, \quad 5x^2 + 4cx + c^2 - 1 = 0. \end{cases}$$

Квадратное уравнение имеет только одно решение, когда дискриминант равен нулю:  $(4c)^2 - 4 \cdot 5 \cdot (c^2 - 1) = 0$ , откуда  $c = \pm\sqrt{5}$ .

Итак, искомые касательные имеют уравнения

$$2x + y + \sqrt{5} = 0, \quad 2x + y - \sqrt{5} = 0.$$

Задача 10. Дан эллипс  $9x^2 + 25y^2 = 225$ . Найти: 1) его полуоси; 2) фокусы; 3) эксцентриситет; 4) уравнения директрис.

Решение. Делим на 225, получаем

$$\frac{x^2}{25} + \frac{y^2}{9} = 1.$$

Отсюда следует по формуле (53), что  $a = 5$ ,  $b = 3$ . Из формулы (54):

$$c^2 = a^2 - b^2 = 25 - 9 = 16, \quad c = \pm 4.$$

По формуле (55):  $F_1(-4, 0)$ ,  $F_2(4, 0)$ .

Эксцентриситет (56):  $\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{4}{5}$ .

Уравнения директрис согласно (58):  $x = \pm \frac{5}{4/5} = \pm \frac{25}{4}$ .

Ответ:  $a = 5$ ,  $b = 3$ ;  $F_1(-4, 0)$ ,  $F_2(4, 0)$ ;  $\varepsilon = \frac{4}{5}$ ;  $x = \pm \frac{25}{4}$ .

Задача 11. Составить каноническое уравнение эллипса, у которого малая полуось  $2\sqrt{6}$ , а расстояние между фокусами  $F_1F_2 = 8$ .

Решение.  $b = 2\sqrt{6}$ ,  $F_1F_2 = 2c = 8$ ,  $c = 4$ .

По формуле (54):  $a^2 = b^2 + c^2$ ,  $a^2 = (2\sqrt{6})^2 + 4^2 = 40$ ,  $a = \sqrt{40} = 2\sqrt{10}$ .

Уравнение эллипса согласно (53):  $\frac{x^2}{40} + \frac{y^2}{24} = 1$ .

Задача 12. Асимптоты гиперболы имеют уравнения  $4y \pm 3x = 0$ , а расстояние между фокусами равно 20. Написать ее каноническое уравнение.

Решение. Уравнения асимптот  $y = \pm \frac{3}{4}x$ , согласно формуле (62):

$\frac{b}{a} = \frac{3}{4}$ . Кроме того  $F_1F_2 = 2c = 20$ ,  $c = 10$ . По формуле (61):

$c^2 = a^2 + b^2$ , получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{b}{a} = \frac{3}{4} \\ a^2 + b^2 = 100. \end{cases}$$

Решая ее, получаем  $a = 8$ ,  $b = 6$ . Следовательно, каноническое уравнение гиперболы:  $\frac{x^2}{64} - \frac{y^2}{36} = 1$ .

Задача 13. Дана гипербола  $\frac{x^2}{9} - \frac{y^2}{1} = -1$ . Найти координаты фокусов и вершин, эксцентриситет, уравнения асимптот и директрис.

Решение. Фокусы данной гиперболы расположены на оси  $Oy$ .

$$a = 1, b = 3, c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{9 + 1} = \sqrt{10}. \quad (61)$$

Значит фокусы имеют координаты  $F_1(0, -\sqrt{10})$ ,  $F_2(0, \sqrt{10})$ . Вершины  $A_1(0, -1)$ ,  $A_2(0, 1)$ ,  $B_1(-3, 0)$ ,  $B_2(3, 0)$ . Эксцентриситет по формуле (64):

$$\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{10}}{1}, \quad \varepsilon = \sqrt{10}.$$

Уравнения асимптот:  $x = \pm \frac{b}{a}y \Rightarrow x = \pm 3y$ .

Уравнения директрис:  $y = \pm \frac{b}{c} \Rightarrow y = \pm \frac{3}{\sqrt{10}}$ .

Задача 14. Парабола с вершиной в начале координат проходит через точку  $A(1, -2)$  и симметрична относительно оси  $Oy$ . Написать ее уравнение. Найти фокус и директрису.

Решение. Уравнение искомой параболы по формуле (72) имеет вид  $x^2 = -2py$ . Точка  $A(1, -2)$  лежит на параболе. Подставляем координаты точки  $A$  в уравнение:  $1 = -2p \cdot (-2) \Rightarrow p = \frac{1}{4}$ . Следовательно, искомое уравнение будет  $x^2 = -\frac{1}{2}y$  или  $y = -2x^2$ .

Фоку параболы:  $F(0, -\frac{1}{8})$ . Уравнение директрисы согласно (72):  $y = \frac{1}{8}$ .

Задача 15. На параболе  $y^2 = 4x$  найти точки, расстояния которых от директрисы равно 5.

Решение. Уравнение директрисы данной параболы  $x = -\frac{p}{2}$ ,  $2p = 4$ ,  $p = 2$ ,  $x = -1$ . Тогда расстояние от оси  $Oy$  до искомой

$\ell = 4 - \frac{p}{2} = 5 - 1 = 4$  точки и это расстояние определит координату  $x$  данной точки, т.е.  $x = 4$ . Координату  $y$  найдем из уравнения параболы:  
 $y^2 = 4x, \quad y^2 = 4 \cdot 4 = 16, \quad y = \pm 4$ .  
 Итак,  $M_1(4, 4), M_2(4, -4)$ .

## 1. Пределы

Пусть каждому натуральному числу  $n = 1, 2, \dots$  приведено в соответствие в силу некоторого закона число  $u_n$ . Тогда говорят, что определена последовательность чисел  $u_1, u_2, u_3, \dots$  или, короче, последовательность  $\{u_n\}$ . Отдельные числа  $u_n$  называются ее элементами.

Определение 1.1. Число  $a$  называется пределом последовательности  $\{u_n\}$ , если для любого положительного числа  $\varepsilon$  найдется зависящее от него натуральное число  $N$  такое, что для всех натуральных чисел  $n > N$  выполняется неравенство:  $|u_n - a| < \varepsilon$ . При этом пишут:  $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = a$ .

Определение 1.2. Говорят, что функция  $f(x)$  стремится к  $A$  ( $f(x) \rightarrow A$ ) при стремлении к  $a$  ( $x \rightarrow a$ ), где  $A$  и  $a$  — числа, или  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A$ , если для любого  $\varepsilon > 0$  существует  $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$  такое, что  $|f(x) - A| < \varepsilon$  при  $|x - a| < \delta$ .

Аналогично,  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = A$ , если  $|f(x) - A| < \varepsilon$  при  $|x| > N(\varepsilon)$  и  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty$ , если  $|f(x)| > M$  при  $|x - a| < \delta(M)$ , где  $M$  — произвольное положительное число.

При вычислении пределов можно использовать следующие теоремы.

1. Если существуют конечные  $\lim_{x \rightarrow a} f_1(x), \lim_{x \rightarrow a} f_2(x)$ , то

$$a) \quad \lim_{x \rightarrow a} [f_1(x) \pm f_2(x)] = \lim_{x \rightarrow a} f_1(x) \pm \lim_{x \rightarrow a} f_2(x)$$

$$б) \quad \lim_{x \rightarrow a} [f_1(x) \cdot f_2(x)] = \lim_{x \rightarrow a} f_1(x) \cdot \lim_{x \rightarrow a} f_2(x),$$

$$6) \lim_{x \rightarrow a} \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \frac{\lim_{x \rightarrow a} f_1(x)}{\lim_{x \rightarrow a} f_2(x)} \quad \left( \lim_{x \rightarrow a} f_2(x) \neq 0 \right).$$

2. Если  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A \neq 0$ ,  $\lim_{x \rightarrow a} f_2(x) = 0$  ( $A$  – конечно), то

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \infty,$$

если  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A$ ,  $\lim_{x \rightarrow a} f_2(x) = \infty$  ( $A$  – конечно), то

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = 0.$$

Эти утверждения справедливы, если вместо двух функций  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  взять соответственно две последовательности:  $\{u_n\}$  и  $\{v_n\}$ .

В простейших случаях нахождение предела сводится к подстановке в данное выражение предельного значения аргумента, часто, однако, приходится, прежде чем перейти к пределу, проводить преобразование данного выражения. Это следует делать в тех случаях, когда имеют место так называемые неопределенности:  $\frac{0}{0}$ ;  $\frac{\infty}{\infty}$ ;  $0 \cdot \infty$ ;  $\infty - \infty$ ;  $0^0$ ;  $1^\infty$ ;  $\infty^0$ .

Пример 1.1. При отыскании предела отношения двух целых многочленов относительно  $x$  при  $x \rightarrow \infty$  или  $n$  при  $n \rightarrow \infty$  для последовательностей (неопределенность  $\frac{\infty}{\infty}$ ) оба члена соотношения полезно предварительно разделить на  $x^m$  или, соответственно,  $n^m$  где  $m$  – наивысшая степень этих многочленов.

Аналогичный прием во многих случаях можно применить и для дробей, содержащих иррациональности.

$$\begin{aligned} a) \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3x^4 + 2x^2 - 1}{5x^4 + 3x + 2} &= \left( \frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^4 \left( 3 + \frac{2}{x^2} - \frac{1}{x^4} \right)}{x^4 \left( 5 + \frac{3}{x^3} + \frac{2}{x^4} \right)} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3 + \frac{2}{x^2} - \frac{1}{x^4}}{5 + \frac{3}{x^3} + \frac{2}{x^4}} = \\ &= \frac{\lim_{x \rightarrow \infty} 3 + \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2}{x^2} - \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^4}}{\lim_{x \rightarrow \infty} 5 + \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3}{x^3} + \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2}{x^4}} = \frac{3 + 0 + 0}{5 + 0 + 0} = \frac{3}{5}, \quad \text{старшая степень } m = 4, \\ &\text{делится на } x^4. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{б) } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3\sqrt{9n^4 - 2n^3 + 2} + 4\sqrt[3]{8n^3 + 21}}{\sqrt[4]{n^4 - 3} + 2\sqrt{4n^4 + 9n}} &= \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3 \cdot \sqrt{n^4 \left(9 - \frac{2}{n} + \frac{2}{n^4}\right)} + 4 \cdot \sqrt[3]{n^3 \left(8 + \frac{21}{n^3}\right)}}{\sqrt[4]{n^4 \left(1 - \frac{3}{n^4}\right)} + 2 \cdot \sqrt{n^4 \left(4 + \frac{9}{n^3}\right)}} = \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n^2 \cdot \sqrt{\left(9 - \frac{2}{n} + \frac{2}{n^4}\right)} + 4n \cdot \sqrt[3]{\left(8 + \frac{21}{n^3}\right)}}{n \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{3}{n^4}\right)} + 2n^2 \cdot \sqrt{\left(4 + \frac{9}{n^3}\right)}} = \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3 \cdot \sqrt{\left(9 - \frac{2}{n} + \frac{2}{n^4}\right)} + \frac{4}{n} \cdot \sqrt[3]{\left(8 + \frac{21}{n^3}\right)}}{\frac{1}{n} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{3}{n^4}\right)} + 2 \cdot \sqrt{\left(4 + \frac{9}{n^3}\right)}} = \frac{3 \cdot \sqrt{9 - 0 + 0} + 0 \cdot \sqrt[3]{8 + 0}}{0 \cdot \sqrt[4]{1 - 0} + 2 \cdot \sqrt{4 + 0}} = \frac{9}{4}
\end{aligned}$$

(неопределенность  $\frac{\infty}{\infty}$ , старшая степень  $m = 2$ , делится на  $n^2$ ).

$$\begin{aligned}
\text{в) } \lim_{x \rightarrow \infty} (3x + 1) \left[ \sqrt{x^2 + 4x + 5} - \sqrt{x^2 + 4x + 7} \right] &= [\infty \cdot (\infty - \infty)] = \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(3x + 1) \left[ \sqrt{x^2 + 4x + 5} - \sqrt{x^2 + 4x + 7} \right] \cdot \left[ \sqrt{x^2 + 4x + 5} + \sqrt{x^2 + 4x + 7} \right]}{\sqrt{x^2 + 4x + 5} + \sqrt{x^2 + 4x + 7}} = \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(3x + 1)(x^2 + 4x + 5 - x^2 - 4x + 7)}{\sqrt{x^2 + 4x + 5} + \sqrt{x^2 + 4x + 7}} = \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(3x + 1) \cdot 12}{\sqrt{x^2 + 4x + 5} + \sqrt{x^2 + 4x + 7}} \left( \frac{:x}{:x} \right) = \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{12 \left( 3 + \frac{1}{x} \right)}{\sqrt{1 + \frac{4}{x} + \frac{5}{x^2}} + \sqrt{1 + \frac{4}{x} + \frac{7}{x^2}}} = \frac{12 \cdot 3}{1 + 1} = 18.
\end{aligned}$$

Пример 1.2. Если  $P(x)$  и  $Q(x)$  – целые многочлены  $x$ ,  $P(a) \neq 0$  или  $Q(a) \neq 0$ , то предел рациональной дроби  $P/Q$  при  $x \rightarrow a$  находится

непосредственно. Если же  $P(a) = Q(a) = 0$  (неопределенность  $\frac{0}{0}$ ), то дробь  $P/Q$  рекомендуется сократить один или несколько раз на  $(x - a)$ .

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^3 - 3x + 2}{x^4 - 4x + 3} &= \left( \frac{0}{0} \right) = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{(x-1)(x^2 + x - 2)}{(x-1)(x^3 + x^2 + x - 3)} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^2 + x - 2}{x^3 + x^2 + x - 3} = \\ &= \left( \frac{0}{0} \right) = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{(x-1)(x+2)}{(x-1)(x^2 + 2x + 3)} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x+2}{x^2 + 2x + 3} = \frac{1+2}{1+2+3} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Пример 1.3. Одним из примеров нахождения предела от иррационального выражения является перевод иррациональности из числителя в знаменатель или наоборот (неопределенность  $\frac{0}{0}$ ).

$$\begin{aligned} a) \quad \lim_{x \rightarrow 4} \frac{3 - \sqrt{5+x}}{1 - \sqrt[3]{5-x}} &= \left( \frac{0}{0} \right) = \lim_{x \rightarrow 4} \frac{(3 - \sqrt{5+x})(3 + \sqrt{5+x})}{(1 - \sqrt[3]{5-x})(3 + \sqrt{5+x})} = \\ &= \lim_{x \rightarrow 4} \frac{9 - 5 - x}{(1 - \sqrt[3]{5-x})(3 + \sqrt{5+x})} = \\ &= \lim_{x \rightarrow 4} \frac{4-x}{1 - \sqrt[3]{5-x}} \cdot \lim_{x \rightarrow 4} \frac{1}{3 + \sqrt{5+x}} = \lim_{x \rightarrow 4} \frac{4-x}{1 - \sqrt[3]{5-x}} \cdot \frac{1}{6} = \\ &= \frac{1}{6} \lim_{x \rightarrow 4} \frac{(4-x)(1 + \sqrt[3]{5-x} + \sqrt[3]{(5-x)^2})}{(1 - \sqrt[3]{5-x})(1 + \sqrt[3]{5-x} + \sqrt[3]{(5-x)^2})} = \\ &= \frac{1}{6} \lim_{x \rightarrow 4} \frac{(4-x)(1 + \sqrt[3]{5-x} + \sqrt[3]{(5-x)^2})}{x-4} = -\frac{1}{6} \lim_{x \rightarrow 4} (1 + \sqrt[3]{5-x} + \sqrt[3]{(5-x)^2}) = \\ &= -\frac{1}{6}(1+1+1) = -\frac{1}{2}. \end{aligned}$$

$$б) \quad \lim_{x \rightarrow 8} \frac{\sqrt[3]{x} - 2}{x^2 - 7x - 8} = \left( \frac{0}{0} \right) = \lim_{x \rightarrow 8} \frac{(\sqrt[3]{x} - 2)(\sqrt[3]{x^2} + 2\sqrt[3]{x} + 4)}{(x^2 - 7x - 8)(\sqrt[3]{x^2} + 2\sqrt[3]{x} + 4)} =$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{x \rightarrow 8} \frac{x-8}{(x-8)(x+1)(\sqrt[3]{x^2} + 2\sqrt[3]{x} + 4)} = \lim_{x \rightarrow 8} \frac{1}{(x+1)(\sqrt[3]{x^2} + 2\sqrt[3]{x} + 4)} = \\
&= \frac{1}{9 \cdot 12} = \frac{1}{108}.
\end{aligned}$$

**Пример 1.4.** При вычислении пределов во многих случаях используют «первый замечательный предел»:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1,$$

следствием которого являются пределы:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} x}{x} = 1, \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arcsin x}{x} = 1, \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{arctg} x}{x} = 1.$$

$$\begin{aligned}
a) \quad &\lim_{x \rightarrow 0} \left[ \operatorname{ctg}^2 3x - \operatorname{ctg}^2 5x \right] \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 4x \cdot \arcsin^2 x}{x^2} = \\
&= \lim_{x \rightarrow 0} \left[ \frac{\cos^2 3x}{\sin^2 3x} - \frac{\cos^2 5x}{\sin^2 5x} \right] \cdot \frac{\left( \frac{\operatorname{tg} 4x}{4x} \right)^2 \cdot 16x^2 \cdot \left( \frac{\arcsin x}{x} \right)^2 \cdot x^2}{x^2} = \\
&= \lim_{x \rightarrow 0} 16x^2 \cdot \left[ \frac{\cos^2 3x}{\sin^2 3x} - \frac{\cos^2 5x}{\sin^2 5x} \right] \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{\operatorname{tg} 4x}{4x} \right)^2 \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{\arcsin x}{x} \right)^2 = \\
&= \lim_{x \rightarrow 0} \left[ \frac{\cos^2 3x \cdot 16x^2}{\left( \frac{\sin 3x}{3x} \right)^2 \cdot 9x^2} - \frac{\cos^2 5x \cdot 16x^2}{\left( \frac{\sin 5x}{5x} \right)^2 \cdot 25x^2} \right] \cdot 1^2 \cdot 1^2 = \\
&= \lim_{x \rightarrow 0} \left[ \frac{16}{9} \cos^2 3x - \frac{16}{25} \cos^2 5x \right] = \frac{16}{9} \cdot 1 - \frac{16}{25} \cdot 1 = \frac{256}{225}. \\
b) \quad &\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg}^2 2x \cdot \sqrt{1 - \cos 4x}}{x^2 \cdot \arcsin 3x} = \left( \frac{0}{0} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\left( \frac{\operatorname{tg} 2x}{2x} \right)^2 \cdot 4x^2 \cdot \sqrt{2 \sin^2 2x}}{x^2 \cdot \left( \frac{\arcsin 3x}{3x} \right) \cdot 3x} = \\
&= \frac{\lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{\operatorname{tg} 2x}{2x} \right)^2}{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arcsin 3x}{3x}} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4\sqrt{2} \sin 2x}{3x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4\sqrt{2} \left( \frac{\sin 2x}{2x} \right) \cdot 2x}{3x} = \frac{8\sqrt{2}}{3}.
\end{aligned}$$

**Пример 1.5.** При вычислении предела выражения, содержащего тригонометрические функции, когда  $x \rightarrow a$  и  $a \neq 0$ , рекомендуется предварительно провести замену  $x - a = y$ .

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\cos \frac{\pi \cdot x}{6}}{x - 3} &= \left( \frac{0}{0} \right) = (x - 3 = y, y \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow 3) = \\ &= \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\cos \frac{\pi \cdot (y + 3)}{6}}{y} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{1}{y} \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot y}{6} + \frac{\pi}{2} \right) = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{-\frac{\pi}{6} \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{6}}{\frac{\pi \cdot y}{6}} = \\ &= -\frac{\pi}{6} \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\sin \frac{\pi \cdot y}{6}}{\frac{\pi \cdot y}{6}} = -\frac{\pi}{6} \cdot 1 = -\frac{\pi}{6}. \end{aligned}$$

**Пример 1.6.** При вычислении пределов вида  $\lim_{x \rightarrow a} [f(x)]^{\varphi(x)} = c$  необходимо иметь в виду, что

1) если существуют конечные пределы  $A = \lim_{x \rightarrow a} f(x)$ ,  $B = \lim_{x \rightarrow a} \varphi(x)$ ,

то  $c = A^B$  ( $A > 0$ );

2) если  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A \neq 1$ ,  $\lim_{x \rightarrow a} \varphi(x) = \pm\infty$ , то вопрос о нахождении предела  $c$  решается непосредственно;

3) если  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 1$ ,  $\lim_{x \rightarrow a} \varphi(x) = \infty$ , то следует воспользоваться

«вторым замечательным пределом»:  $\lim_{x \rightarrow a} (1 + g(x))^{\frac{1}{g(x)}} = e$ , где  $g(x) \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow a$  и  $e = 2,718\dots$ .

$$a) \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{3x^2 - x + 1}{2x^2 + x + 1} \right)^{\frac{x^2}{x-1}} = \left( \frac{3}{2} \right)^{-\infty} = \frac{1}{\left( \frac{3}{2} \right)^{+\infty}} = 0, \text{ т.к.}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3x^2 - x + 1}{2x^2 + x + 1} = \frac{3}{2}, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2}{x-1} = -\infty.$$

$$б) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{\sin 4x}{x} \right)^{x+3} = 4^3 = 64, \text{ т.к. } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 4x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{\sin 4x}{4x} \right) \cdot 4 = 4,$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} (x + 3) = 3.$$

$$\begin{aligned} \text{в) } \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{3x+1}{3x-1} \right)^{2x} &= (1^\infty) = \lim_{x \rightarrow \infty} \left( 1 + \frac{7}{3x-6} \right)^{2x} = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left( 1 + \frac{7}{3x-6} \right)^{\frac{3x-6}{7} \cdot \frac{7}{3x-6} \cdot 2x} = \left[ \lim_{x \rightarrow \infty} \left( 1 + \frac{7}{3x-6} \right)^{\frac{3x-6}{7}} \right]^{\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{14x}{3x-6}} = e^{14/3}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{г) } \lim_{x \rightarrow 3} (7-2x)^{\frac{3}{x-3}} &= (1^\infty) = \lim_{x \rightarrow 3} [1 + (6-2x)]^{\frac{3}{x-3}} = \\ &= \lim_{x \rightarrow 3} \left\{ [1 + (6-2x)]^{\frac{1}{6-2x}} \right\}^{\frac{(6-2x) \cdot 3}{x-3}} = e^{\lim_{x \rightarrow 3} \frac{18-6x}{x-3}} = e^{-6}. \end{aligned}$$

## 2. Бесконечно малые и бесконечно большие функции

Определение 2.1. Если  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 0$ , то функция  $f(x)$  называется бесконечно малой в окрестности точки  $x = a$  (при  $x \rightarrow a$ ).

Сумма и произведение конечного числа бесконечно малых функций при  $x \rightarrow a$  есть также бесконечно малая при  $x \rightarrow a$ .

Определение 2.2. Если  $f(x)$  и  $g(x)$  – бесконечно малые при  $x \rightarrow a$  и  $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = c$ , где  $c$  – некоторое число, отличное от нуля, то функции  $f(x)$  и  $g(x)$  называются бесконечно малыми одного порядка при  $x \rightarrow a$ , если  $c = 0$ , то говорят, что  $f(x)$  – бесконечно малая высшего порядка по сравнению с  $g(x)$  при  $x \rightarrow a$ .

Бесконечно малая  $f(x)$  называется бесконечно малой порядка  $n$  по сравнению с  $g(x)$  при  $x \rightarrow a$ , если

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g^n(x)} = c, \quad 0 < |c| < +\infty.$$

Пример 2.1. При  $x \rightarrow 0$  определить порядок малости функции  $\lg x - \sin x$  относительно  $x$ .

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} x - \sin x}{x^n} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x \left( \frac{1}{\cos x} - 1 \right)}{x^n} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x (1 - \cos x)}{x^n \cos x} = \\
&= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \sin x \cdot \sin^2 \frac{x}{2}}{x^n \cos x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4 \sin^3 \frac{x}{2} \cdot \cos \frac{x}{2}}{x^n \cos x} = 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^3 \frac{x}{2}}{x^n} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos \frac{x}{2}}{\cos x} = \\
&= 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^3 \frac{x}{2}}{x^n} \cdot 1 = 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^3 \frac{x}{2}}{\left( \frac{x}{2} \right)^n \cdot 2^n} = \frac{4}{2^n} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^3 \frac{x}{2}}{\left( \frac{x}{2} \right)^n}.
\end{aligned}$$

Этот предел будет равен константе  $c \neq 0$  при  $n = 3$ , следовательно, функция  $\operatorname{tg} x - \sin x$  имеет порядок малости  $n = 3$  относительно  $x$  при  $x \rightarrow 0$ .

Сумма двух бесконечно малых различных порядков равносильна тому из слагаемых, порядок которого ниже.

Пример 2.2. Определить порядок малости относительно  $x$  при  $x \rightarrow 0$  суммы  $\sqrt[3]{x^2} + \sqrt{x^3}$ .

Слагаемое  $\sqrt[3]{x^2}$  имеет порядок малости  $\frac{2}{3}$  относительно  $x$ , а слагаемое  $\sqrt{x^3}$  — порядок  $\frac{3}{2}$ , следовательно, сумма имеет порядок малости  $\frac{2}{3}$  относительно  $x$  при  $x \rightarrow 0$ .

Определение 2.3. Если  $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = 1$ , то бесконечно малые  $f(x)$  и  $g(x)$  называются эквивалентными при  $x \rightarrow a$ :  $f(x) \sim g(x)$ .

Например, при  $x \rightarrow 0$  будем иметь:

$$\sin x \sim x, \quad \operatorname{tg} x \sim x, \quad \arcsin x \sim x, \quad \operatorname{arctg} x \sim x,$$

$$\ln(1+x) \sim x, \quad \cos x \sim 1 - \frac{x^2}{2}, \quad e^x - 1 \sim x, \quad a^x - 1 \sim x \cdot \ln a \quad (a \neq 1).$$

Предел отношения двух бесконечно малых не изменится, если члены отношения заменить эквивалентными им величинами.

Пример 2.3.

$$\begin{aligned}
 a) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{3^{4\operatorname{tg}^2 x} - 5^{3\arcsin^2 3x}}{3\sin^2 4x + 7\arctg^2 x} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(3^{4\operatorname{tg}^2 x} - 1) - (5^{3\arcsin^2 x} - 1)}{3 \cdot (4x)^2 + 7 \cdot (x)^2} = \\
 &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4\operatorname{tg}^2 x \cdot \ln 3 - 3\arcsin^2 3x \cdot \ln 5}{55x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4\ln 3 \cdot x^2 - 3\ln 5 \cdot (3x)^2}{55x^2} = \\
 &= \frac{4\ln 3 - 27\ln 5}{55}.
 \end{aligned}$$

$$b) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{4\arcsin 2x}{3\operatorname{tg} 8x} \right)^{\frac{\ln(1+3x)}{x}} = \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{4 \cdot 2x}{3 \cdot 8x} \right)^{\frac{3x}{x}} = \left( \frac{1}{3} \right)^3 = \frac{1}{27}.$$

$$\begin{aligned}
 в) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(3-5x) - \ln(3+7x)}{2\sin x} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \left[ 3 \left( 1 - \frac{5}{3}x \right) \right] - \ln \left[ 3 \left( 1 + \frac{7}{3}x \right) \right]}{2x} = \\
 &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln 3 + \ln \left( 1 - \frac{5}{3}x \right) - \ln 3 - \ln \left( 1 + \frac{7}{3}x \right)}{2x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{5}{3}x - \frac{7}{3}x}{2x} = -2.
 \end{aligned}$$

Определение 2.4. Если  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty$ , то функция  $f(x)$  называется бесконечно большой при  $x \rightarrow a$ .

Подобно тому, как это сделано для бесконечно малых, вводится понятие бесконечно больших различных порядков.

Пример 2.4. Пусть  $x \rightarrow \infty$ . Определить порядок бесконечно большой

$$f(x) = \frac{x^5}{x+2} \text{ по сравнению с } x.$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left[ \frac{x^5}{x+2} : x^n \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^5}{x^n(x+2)} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^5}{x^{n+1} + x^n \cdot 2} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^5}{x^{n+1}} = 1$$

при  $n = 4$ .

Определение 2.5.

1) Пусть функция  $f(x)$  — бесконечно большая или бесконечно малая при  $x \rightarrow \infty$  и  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{c \cdot x^\alpha} = 1$ , где  $c$  и  $\alpha$  — константы, тогда функция  $y = cx^\alpha$  называется асимптотикой или асимптотически эквивалентной функции  $f(x)$  при  $x \rightarrow \infty$ .

2) Пусть функция  $f(x)$  – бесконечно большая или бесконечно малая при  $x \rightarrow a$  и  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{c \cdot (x-a)^\alpha} = 1$ , где  $c$  и  $\alpha$  – константы, тогда функция  $y = c(x-a)^\alpha$  называется асимптотикой или асимптотически эквивалентной функции  $f(x)$  при  $x \rightarrow a$ .

### Пример 2.5.

а) Найти асимптотику (асимптотическое представление) функции  $\sqrt{x+1} - \sqrt{x}$  при  $x \rightarrow \infty$ .

$$\begin{aligned}\sqrt{x+1} - \sqrt{x} &= \frac{(\sqrt{x+1} - \sqrt{x})(\sqrt{x+1} + \sqrt{x})}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x}} = \frac{x+1-x}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x}} \sim \frac{1}{2\sqrt{x}} = \frac{1}{2 \cdot x^{1/2}},\end{aligned}$$

следовательно, асимптотикой функции  $f(x) = \sqrt{x+1} - \sqrt{x}$  при  $x \rightarrow \infty$  является функция  $\frac{1}{2}x^{-1/2}$ ;  $c = \frac{1}{2}$ ;  $\alpha = -\frac{1}{2}$ .

б) Найти асимптотику функции  $f(x) = \frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}}$  при  $x \rightarrow 1$ .

При  $x \rightarrow 1$  функции  $f(x) = \frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}}$  является бесконечно большой:  $\frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}} = \frac{x}{\sqrt[3]{(1-x)(1+x+x^2)}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{3(1-x)}} = \frac{1}{\sqrt[3]{3}(1-x)^{1/3}}.$

Асимптотикой в данном случае является функция  $y = \frac{1}{\sqrt[3]{3}}(1-x)^{-1/3}$ .

в) Найти асимптотику функции  $f(x) = x^3 - 3x + 2$  при  $x \rightarrow 1$ .

В данном случае при  $x \rightarrow 1$  функция  $f(x)$  является бесконечно малой;  $f(x) = x^3 - 3x + 2 = (x-1)^2(x+2) \sim 3(x-1)^2$ .

Получаем асимптотику  $y = 3(x-1)^2$ ;  $c = 3$ ;  $\alpha = 2$ .

### 3. Непрерывность функции.

Определение 3.1. Если  $x < a$  и  $x \rightarrow a$ , то условно пишут  $x \rightarrow a-0$ , аналогично, если  $x > a$   $x \rightarrow a$ , то  $x \rightarrow a+0$ . Числа

$f(a-0) = \lim_{x \rightarrow a-0} f(x)$  и  $f(a+0) = \lim_{x \rightarrow a+0} f(x)$  называют соответственно пределом слева функции  $f(x)$  в точке  $a$  и пределом справа функции  $f(x)$  в точке  $a$  (если эти числа существуют).

Для существования предела функции  $f(x)$  при  $x \rightarrow a$  необходимо и достаточно, чтобы имело место равенство:  $f(a-0) = f(a+0)$ .

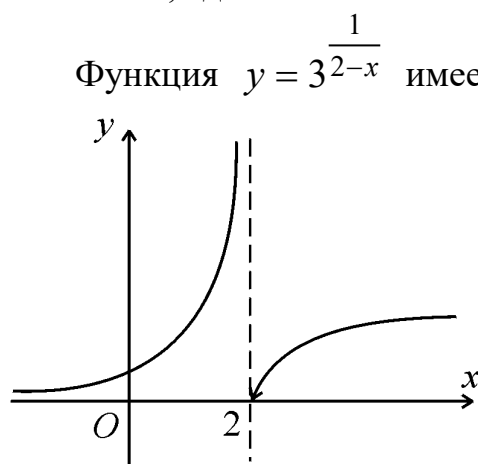
**Определение 3.2.** Функция  $y = f(x)$  называется непрерывной в точке  $a$ , если

- 1) она определена в этой точке;
- 2)  $\lim_{x \rightarrow a-0} f(x) = \lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$ .

Точки, в которых нарушается условие непрерывности, называются точками разрыва.

**Пример 3.1.**

а) Найти точки разрыва функции  $y = 3^{\frac{1}{2-x}}$ , пределы слева и справа в этих точках, сделать схематический чертеж.



Функция  $y = 3^{\frac{1}{2-x}}$  имеет разрыв в точке  $x = 2$ , т.к. она в этой точке не определена. При этом:

$$\lim_{x \rightarrow 2-0} 3^{\frac{1}{2-x}} = 3^{\frac{1}{+0}} = 3^{+\infty} = +\infty;$$

$$\lim_{x \rightarrow 2+0} 3^{\frac{1}{2-x}} = 3^{\frac{1}{-0}} = 3^{-\infty} = \frac{1}{3^{+\infty}} = \frac{1}{+\infty} = 0.$$

б) Найти точки разрыва и величину скачка в этих точках функции

$$y = \frac{\frac{1}{2^{x+3}} + 4x - 8}{\frac{1}{2^{x+3}} + 4}.$$

Точкой разрыва данной функции является точка  $x = -3$ , т.к. в ней функция не определена.

$$\lim_{x \rightarrow -3-0} \frac{2^{1/(x+3)} + 4x - 8}{2^{1/(x+3)} + 4} = \frac{2^{-\infty} - 12 - 8}{2^{-\infty} + 4} = \frac{0 - 20}{0 + 4} = -5;$$

$$\lim_{x \rightarrow -3+0} \frac{2^{1/(x+3)} + 4x - 8}{2^{1/(x+3)} + 4} = 1, \text{ т.к. при } x \rightarrow -3+0 \text{ имеем:}$$

$$2^{1/(x+3)} + 4x - 8 \sim 2^{1/(x+3)}; \quad 2^{1/(x+3)} + 4 \sim 2^{1/(x+3)}.$$

Величина скачка  $\Delta = 1 - (-5) = 6$ .

в) Найти точки разрыва, величину скачка  $\Delta$  и построить график функции

$$y = \begin{cases} -3x, & x \leq 0 \\ 4\sin x, & 0 < x \leq \frac{\pi}{2} \\ x^2 + 1, & \frac{\pi}{2} < x. \end{cases}$$

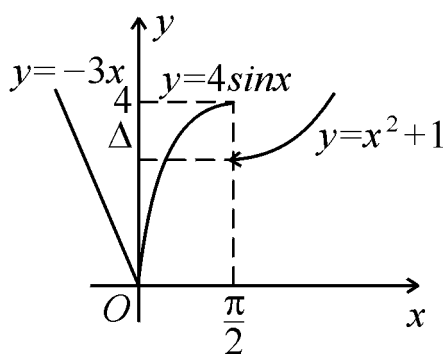
Данная функция непрерывна для  $x \in (-\infty; 0) \cup (0; \frac{\pi}{2}) \cup (\frac{\pi}{2}; +\infty)$ .

Исследуем только точки  $x_1 = 0$  и  $x_2 = \frac{\pi}{2}$ , т.к. в них меняется аналитическое выражение функции.

$$\lim_{x \rightarrow -0} f(x) = \lim_{x \rightarrow -0} (-3x) = 0; \quad \lim_{x \rightarrow +0} f(x) = \lim_{x \rightarrow +0} (4\sin x) = 0;$$

$f(0) = -3x|_{x=0} = 0$ , следовательно, в точке  $x = 0$  функция  $f(x)$  непрерывна.

$$\lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} f(x) = \lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} (4\sin x) = 4; \quad f\left(\frac{\pi}{2}\right) = 4\sin \frac{\pi}{2} = 4;$$



$$\lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{2}+0} f(x) = \lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{2}+0} (x^2 + 1) = \frac{\pi^2}{4} + 1 = 3,467,$$

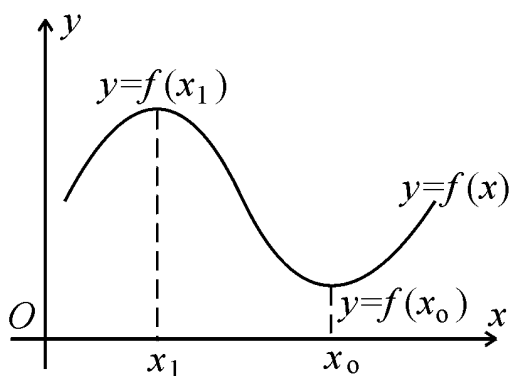
следовательно, точка  $x = \frac{\pi}{2}$  — точка разрыва. Величина скачка

$$\Delta = 4 - \left(\frac{\pi^2}{4} + 1\right) = 3 - \frac{\pi^2}{4} \approx 0,533.$$

## § 1. ЭКСТРЕМУМЫ ФУНКЦИИ ОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

Функция  $y = f(x)$  называется возрастающей (убывающей) на некотором интервале (отрезке), если для любых точек  $x_1, x_2$ , принадлежащих данному интервалу (отрезку), из неравенства  $x_1 < x_2$  следует неравенство  $f(x_1) < f(x_2)$  ( $f(x_1) > f(x_2)$ ). Если  $f(x)$  непрерывна на отрезке  $[a; b]$  и  $f'(x) > 0$  ( $f'(x) < 0$ ) при  $a < x < b$ , то  $f(x)$  возрастает (убывает) на отрезке  $[a; b]$ .

В простейших случаях область существования функции  $f(x)$  можно разбить на конечное число промежутков возрастания и убывания функции (промежутков монотонности). Эти промежутки ограничены критическими точками  $x$  (где  $f'(x) = 0$  или же  $f'(x)$  не существует).



Если существует такая двусторонняя окрестность точки  $x_0$ , что для всякой точки  $x \neq x_0$  этой окрестности имеет место неравенство  $f(x) > f(x_0)$ , то точка  $x_0$  называется точкой минимума функции  $y = f(x)$ , а число  $f(x_0)$  — минимумом функции  $y = f(x)$ .

Аналогично, если для всякой точки  $x \neq x_1$  некоторой окрестности точки  $x_1$  выполняется неравенство  $f(x) < f(x_1)$ , то  $x_1$  называется точкой максимума функции  $y = f(x)$ , а  $f(x_1)$  — максимумом функции. Точка минимума или максимума функции называется ее точкой экстремума, а минимум или максимум функции — экстремумом функции. Если  $x_0$  — точка экстремума функции  $f(x)$ , то  $f'(x_0) = 0$  или же  $f'(x_0)$  не существует (необходимое условие существования экстремума).

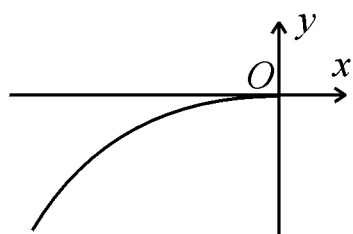
Обратное утверждение не верно: точки, в которых  $f'(x_0) = 0$  или  $f'(x_0)$  не существует (критические точки), не обязательно являются точками экстремума функции  $f(x)$ .

**Достаточный признак существования и отсутствия экстремума** непрерывной функции  $f(x)$  следующий: если существует такая окрестность  $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$  критической точки  $x_0$ , что  $f'(x) > 0$  при  $x_0 - \delta < x < x_0$  и  $f'(x) < 0$  при  $x_0 < x < x_0 + \delta$ , то  $x_0$  — точка макси-

муму функции  $f(x)$ ; если же  $f'(x) < 0$  при  $x_0 - \delta < x < x_0$  и  $f'(x) > 0$  при  $x_0 < x < x_0 + \delta$ , то  $x_0$  – точка минимума функции  $f(x)$ . Если, наконец, найдется такое положительное число  $\delta$ , что  $f'(x)$  сохраняет неизменный знак при  $x_0 - \delta < x < x_0 + \delta$ , то точка  $x_0$  не является точкой экстремума функции  $f(x)$ .

Наименьшее (наибольшее) значение непрерывной функции  $f(x)$  на данном отрезке  $[a; b]$  достигается или в критических точках функции, или на концах отрезка  $[a; b]$ .

Пример 1.1. Найти экстремумы и интервалы монотонности функции  $y = x \cdot \sqrt{-5x}$ .



Область существования:  $-5x \geq 0 \Rightarrow x \leq 0$ .

Находим критические точки:

$$y' = \sqrt{-5x} + x \cdot \frac{1}{2\sqrt{-5x}} \cdot (-5) = \sqrt{-5x} - \frac{5x}{2\sqrt{-5x}} = \frac{-10x - 5x}{2\sqrt{-5x}} = \frac{-15x}{2\sqrt{-5x}} = \frac{3 \cdot (-5x)}{2\sqrt{-5x}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{-5x} \geq 0.$$

При  $x \leq 0$  функция всегда возрастает и принимает наибольшее значение в критической точке  $x = 0$ :  $y(0) = 0$ .

Пример 1.2. Найти экстремумы и интервалы монотонности функции

$$y = \sqrt[3]{(x+1)(2-x)^2}.$$

Область существования:  $x \in (-\infty; +\infty)$ .

Находим критические точки:

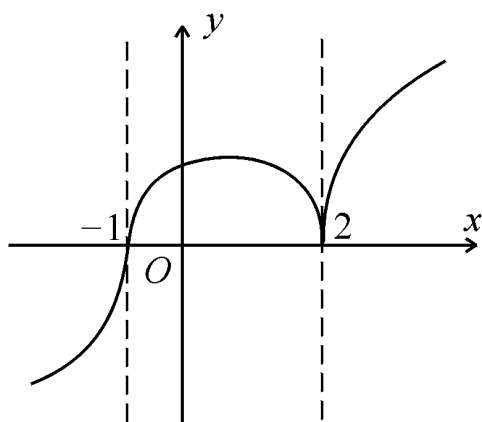
$$y' = \frac{(2-x)^2 - 2(2-x)(x+1)}{3 \cdot \sqrt[3]{(x+1)^2(2-x)^4}} = \frac{(2-x)(2-x-2x-2)}{3 \cdot \sqrt[3]{(x+1)^2(2-x)^4}} = \frac{-x}{\sqrt[3]{(x+1)^2(2-x)}},$$

$$y' = 0 \Rightarrow x_1 = 0,$$

$y'$  не существует  $\Rightarrow x_2 = -1; x_3 = 2$ . Получили три критические точки.

$x$	$(-\infty; -1)$	$-1$	$(-1; 0)$	$0$	$(0; 2)$	$2$	$(2; +\infty)$
$y'$	$+$	не сущ.	$+$	$0$	$-$	не сущ.	$+$
$y$	$\nearrow$		$\nearrow$	max	$\searrow$	min	$\nearrow$

$$\lim_{x \rightarrow 2+0} y'(x) = \lim_{x \rightarrow 2+0} \frac{-x}{\sqrt[3]{(x+1)^2(2-x)}} = +\infty; \quad \lim_{x \rightarrow 2-0} \frac{-x}{\sqrt[3]{(x+1)^2(2-x)}} = -\infty.$$



$$\lim_{x \rightarrow 1-0} y'(x) = \lim_{x \rightarrow 1+0} y'(x) = +\infty.$$

Так как  $y'(x) = k$ , где  $k$  – угловой коэффициент касательной, то при  $x = -1$  и  $x = 2$  касательная к графику функции перпендикулярна оси  $Ox$ .

$$y(-1) = 0; \quad y(0) = \sqrt[3]{4}; \quad y(2) = 0.$$

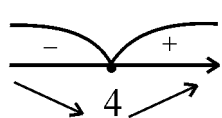
**Пример 1.3.** Найти глубину открытого бассейна с квадратным дном и объемом  $256 \text{ м}^3$  такого, чтобы на облицовку его стен и дна пошло наименьшее количество материала.

Пусть  $a$  – сторона квадрата основания,  $h$  – глубина бассейна;

$$a^2 h = 256 \Rightarrow a^2 = \frac{256}{h}, \quad a = \frac{16}{\sqrt{h}}, \quad h > 0;$$

$$S = S_{\text{бок}} + S_{\text{дна}} = 4ah + a^2 = 4 \cdot \frac{16}{\sqrt{h}} \cdot h + \frac{256}{h} = 64\sqrt{h} + \frac{256}{\sqrt{h}} = F(h);$$

$$F'(h) = \frac{64}{2\sqrt{h}} - \frac{256}{h^2} = \frac{32}{\sqrt{h}} - \frac{256}{h^2} = \frac{32h^{3/2} - 256}{h^2} = \frac{32}{h^2}(h^{3/2} - 8);$$



$F'(h) = 0 \Rightarrow h^{3/2} = 8; \quad h = 4.$  При  $h = 4$  величина  $F(h) = S$  будет наименьшей.

**Пример 1.4.** Две прямые железные дороги  $AA_1$  и  $BB_1$  перпендикулярны друг к другу и пересекаются в пункте  $C$ , причем  $AC = 800 \text{ км}$  и  $BC = 700 \text{ км}$ . Из пунктов  $A$  и  $B$  по направлению к  $C$  одновременно выходят два поезда со скоростями соответственно  $80 \text{ км/ч}$  и  $60 \text{ км/ч}$ . Через сколько часов после отправления расстояние между поездами будет наименьшим?

Отметим положение поездов в момент

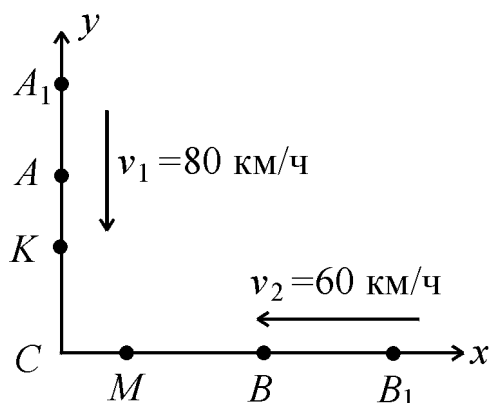
$t > 0$  точками  $K$  и  $M$ .

$$AK = 80t; \quad BM = 60t;$$

$$CK = AC - AK = 800 - 80t;$$

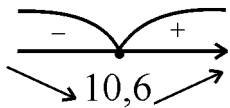
$$CM = CB - BM = 700 - 60t;$$

$$(KM)^2 = (CK)^2 + (CM)^2 =$$



$= (800 - 80t)^2 + (700 - 60t)^2$ ;  $KM$  минимально, если минимальна величина  $(KM)^2 = F(t) = (800 - 80t)^2 + (700 - 60t)^2$ ;

$$F(t) = 2(800 - 80t) \cdot (-80) + 2(700 - 60t) \cdot (-60) = \\ = -128000 + 12800t - 84000t + 7200t = 20000t - 212000 = 0; \quad t = 10,6;$$



$t = 10,6$  — точка минимума функции  $F(t)$ . Через 10,6 часов после отправления расстояние между поездами будет наименьшим.

## § 2. АСИМПТОТЫ

Если точка  $(x; y)$  непрерывно перемещается по кривой  $y = f(x)$  так, что хотя бы одна из координат точки стремится к бесконечности, и при этом расстояние точки от некоторой прямой стремится к нулю, то эта прямая называется *асимптотой* кривой.

Если существует число  $a$  такое, что  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty$ , то прямая  $x = a$  является асимптотой (*вертикальная асимптота*).

Если существуют конечные пределы  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = k_1$  и  $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - k_1x] = b_1$ , то прямая  $y = k_1x + b_1$  будет асимптотой (*правая наклонная асимптота*).

Если существуют конечные пределы  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = k_2$  и  $\lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - k_2x] = b_2$ , то прямая  $y = k_2x + b_2$  будет асимптотой (*левая наклонная асимптота*).

График функции  $y = f(x)$  не может иметь более одной правой и более одной левой асимптоты.

**Пример 2.1.** Найти асимптоты и построить график функции

$$y = 2x + \frac{3 \cos(x-1)}{x-1}.$$

Область существования:  $x \neq 1$ .

Ищем вертикальные асимптоты.

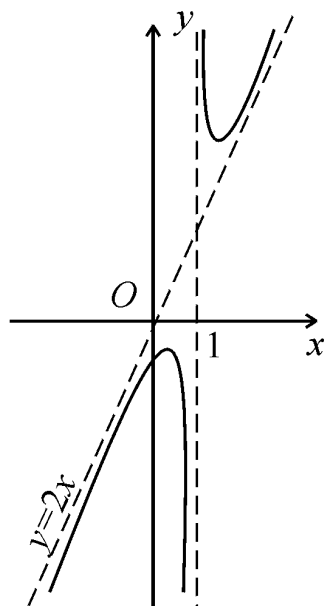
Функция имеет разрыв в точке  $x = 1$ , т.к. в ней функция не определена.

$$\lim_{x \rightarrow 1-0} \left( 2x + \frac{3 \cos(x-1)}{x-1} \right) = 2 + \frac{3 \cdot 1}{-0} = 2 - \infty = -\infty;$$

$$\lim_{x \rightarrow 1+0} \left( 2x + \frac{3\cos(x-1)}{x-1} \right) = 2 + \frac{3 \cdot 1}{+0} = 2 + \infty = +\infty;$$

следовательно,  $x = 1$  – вертикальная асимптота.

Ищем наклонные асимптоты в виде  $y = kx + b$ .



$$\begin{aligned} k &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{1}{x} \left( 2x + \frac{3\cos(x-1)}{x-1} \right) = \\ &= 2 + 0 = 2; \quad b = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - kx] = \\ &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left[ 2x + \frac{3\cos(x-1)}{x-1} - 2x \right] = \\ &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{3\cos(x-1)}{x-1} = 0. \end{aligned}$$

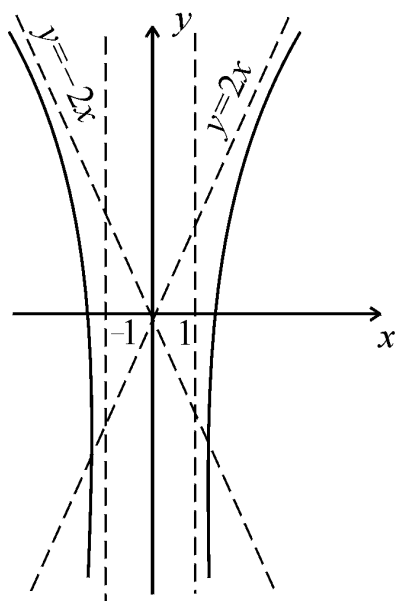
Следовательно, при  $x \rightarrow \pm\infty$  существует асимптота  $y = 2x$ .

Пример 2.2. Найти асимптоты и построить график функции  $y = \frac{2x^2 - 9}{\sqrt{x^2 - 1}}$ .

Область существования:  $x^2 - 1 > 0$ ;  $x^2 > 1$ ;  $x > 1$  и  $x < -1$ .

$$y = \frac{2x^2 - 9}{\sqrt{x^2 - 1}}; \quad y(-x) = \frac{2(-x)^2 - 9}{\sqrt{(-x)^2 - 1}} = \frac{2x^2 - 9}{\sqrt{x^2 - 1}} \Rightarrow y(x) = y(-x),$$

следовательно, данная функция четная, и можно построить ее график только при  $x > 1$ , а затем отразить его симметрично относительно оси  $Oy$ .



$$\lim_{x \rightarrow 1+0} \frac{2x^2 - 9}{\sqrt{x^2 - 1}} = \frac{2 - 9}{+0} = -\infty \Rightarrow x = 1 -$$

вертикальная асимптота при  $x \rightarrow 1+0$ .

Пусть  $x \rightarrow 1+\infty$ .

$$\begin{aligned} k &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x^2 - 9}{x \cdot \sqrt{x^2 - 1}} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x^2 - 9}{x^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2 - \frac{9}{x^2}}{\sqrt{1 - \frac{1}{x^2}}} = 2. \end{aligned}$$

$$b = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - kx] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[ \frac{2x^2 - 9}{\sqrt{x^2 - 1}} - 2x \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x^2 - 9 - 2x \cdot \sqrt{x^2 - 1}}{\sqrt{x^2 - 1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(2x^2 - 9)^2 - 4x^2(x^2 - 1)}{\sqrt{x^2 - 1}(2x^2 - 9 + 2x \cdot \sqrt{x^2 - 1})} = \\
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-32x^2 + 81}{x^3 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} \left( 2 - \frac{9}{x^2} + 2 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} \right)} = 0.
\end{aligned}$$

При  $x \rightarrow +\infty$  получаем асимптоту  $y = 2x$ . График данной функции пересекает ось  $Ox$  при  $2x^2 - 9 = 0$ , т.е. в точках  $x = \pm \frac{3}{\sqrt{2}}$ .

Пример 2.3. Найти асимптоты и построить график функции

$$y = \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{4 - x^2}.$$

Область существования:  $4 - x^2 \neq 0 \Rightarrow x \neq 2$  и  $x \neq -2$ .

В точках  $x_1 = -2$  и  $x_2 = +2$  функция терпит разрыв, т.к. в них она не определена.

$$\lim_{x \rightarrow -2-0} \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{4 - x^2} = \frac{-8 - 8 + 6 + 2}{-0} = +\infty;$$

$$\lim_{x \rightarrow -2+0} \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{4 - x^2} = \frac{-8 - 8 + 6 + 2}{+0} = -\infty;$$

$x = -2$  — вертикальная асимптота.

$$\lim_{x \rightarrow 2-0} \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{4 - x^2} = \frac{8 - 8 - 6 + 2}{+0} = -\infty;$$

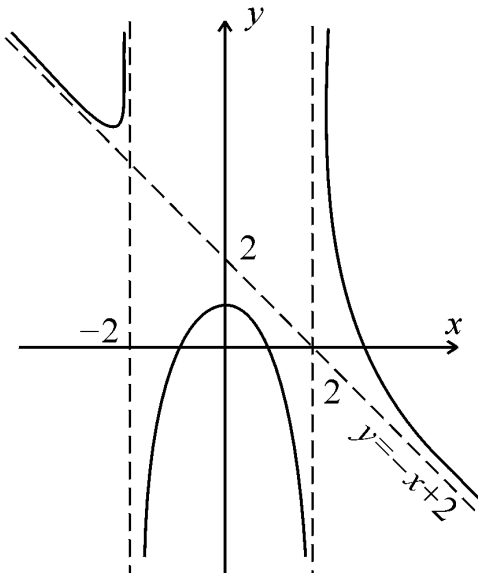
$$\lim_{x \rightarrow 2+0} \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{4 - x^2} = \frac{8 - 8 - 6 + 2}{-0} = +\infty;$$

$x = 2$  — вертикальная асимптота.

Наклонные асимптоты при  $x \rightarrow \pm\infty$  ищем в виде:  $y = kx + b$ .

$$k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{x(4 - x^2)} =$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{1 - \frac{2}{x} - \frac{3}{x^2} + \frac{2}{x^3}}{\frac{4}{x^2} - 1} = \frac{1}{-1} = -1; \quad b = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - kx] =
\end{aligned}$$

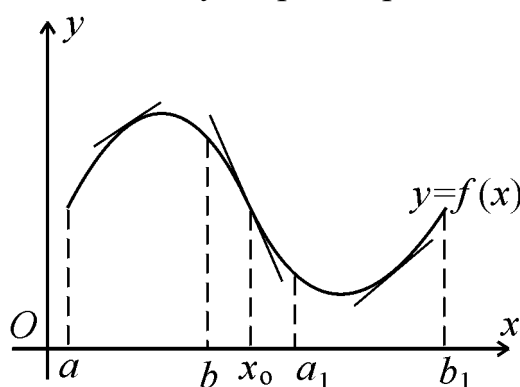


$$= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left( \frac{x^3 - 2x^2 - 3x + 2}{4 - x^2} + x \right) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{-2x^2 + x + 2}{4 - x^2} = 2.$$

При  $x \rightarrow \pm\infty$  получаем асимптоту  $y = -x + 2$ .

### § 3. НАПРАВЛЕНИЕ ВОГНУТОСТИ. ТОЧКИ ПЕРЕГИБА

Говорят, что график дифференцируемой функции  $y = f(x)$  *вогнут вниз* на интервале  $(a; b)$  (*вогнут вверх* на интервале  $(a_1; b_1)$ ), если при  $a < x < b$  дуга кривой расположена ниже (или соответственно при



$a_1 < x < b_1$  выше) касательной, проведенной в любой точке интервала  $(a; b)$  (или интервала  $(a_1; b_1)$ ). Достаточным условием вогнутости вниз (вверх) графика  $y = f(x)$  является выполнение на соответствующем интервале неравенства  $f'(x) < 0$  ( $f'(x) > 0$ ).

Точка  $(x_0, f(x_0))$ , в которой изменяется направление вогнутости графика функции, называется *точкой перегиба*. Для абсциссы точки перегиба  $x_0$  графика функции  $y = f(x)$  вторая производная  $f''(x_0) = 0$  или  $f''(x_0)$  не существует. Точки, в которых  $f''(x) = 0$  или  $f''(x)$  не существует, называются *критическими точками 2-го рода*. Критическая точка 2-го рода  $x_0$  является абсциссой точки перегиба, если  $f''(x)$  сохраняет постоянные знаки в интервалах  $x_0 - \delta < x < x_0$  и  $x_0 < x < x_0 + \delta$ , где  $\delta$  — некоторое положительное число, причем эти знаки противоположны, и не является точкой перегиба, если знаки  $f''(x)$  в указанных выше интервалах одинаковы.

Пример. Определить интервалы вогнутости и выпуклости, а также точки перегиба кривой  $y = e^{-x^2}$ .

Имеем:  $y' = -2xe^{-x^2}$ ;  $y'' = (4x^2 - 2)e^{-x^2}$ . Приравняв вторую производную к нулю, найдем критические точки второго рода:

$x_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$ ,  $x_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Эти точки разбивают всю область существования функции  $(-\infty; +\infty)$  на три интервала.

$x$	$\left(-\infty; -\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\left(-\frac{1}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}; +\infty\right)$
$y''$	+	0	-	0	-
$y$	$\cup$	перегиб	$\cap$	перегиб	$\cup$

Получили: кривая вогнута вверх при  $x \in \left(-\infty; -\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$  и  $x \in \left(\frac{1}{\sqrt{2}}; +\infty\right)$  и вогнута вниз при  $x \in \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ . Точки  $\left(\pm \frac{1}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{e}}\right)$  – точки перегиба.

#### § 4. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ФУНКЦИЙ ПО ХАРАКТЕРНЫМ ТОЧКАМ

При построении графика функции следует, прежде всего, найти область существования этой функции и выяснить поведение функции на границе ее области существования. Полезно также предварительно отметить некоторые особенности функции (если они имеются): четность, периодичность и т.д.

Далее нужно найти точки разрыва, асимптоты, точки экстремума функции, точки перегиба и т.д. Найденные элементы позволяют выяснить общий характер графика функции.

Пример 4.1. Провести полное исследование и построить график функции

$$y = x \cdot \sqrt[3]{(x+2)^2}.$$

Область существования:  $x \in (-\infty; +\infty)$ .

$y(x) \neq y(-x) \Rightarrow$  функция общего вида.

Так как функция определена при всех  $x$ , и у нее нет точек разрыва, то вертикальных асимптот нет. Наклонные асимптоты при  $x \rightarrow \pm\infty$  ищем в виде:  $y = kx + b$ .

$k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x \cdot \sqrt[3]{(x+2)^2}}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \sqrt[3]{(x+2)^2} = +\infty$ , следовательно, наклонных асимптот также нет.

Исследуем функцию по первой производной.

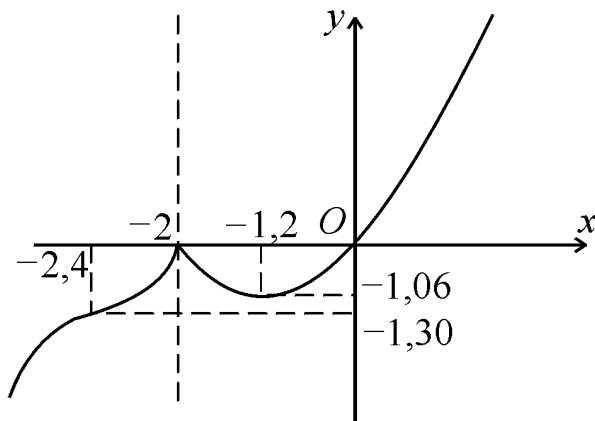
$$y' = \left[ x \cdot \sqrt[3]{(x+2)^2} \right]' = (x+2)^{2/3} + x \cdot \frac{2}{3} \cdot (x+2)^{-1/3} = \frac{3(x+2) + 2x}{\sqrt[3]{x+2}} = \frac{5x+6}{\sqrt[3]{x+2}}.$$

$$y' = 0 \Rightarrow 5x+6=0, \quad x=-1,2;$$

$$y' \text{ не существует} \Rightarrow x+2=0, \quad x=-2.$$

$x$	$(-\infty; -2)$	$-2$	$(-2; -1,2)$	$-1,2$	$(-1,2; +\infty)$
$y'$	$+$	не сущ.	$-$	$0$	$+$
$y$	$\nearrow$	max	$\searrow$	min	$\nearrow$

$y_{\max} = y(-2) = 0$  (касательная в этой точке перпендикулярна оси  $Ox$ ).



$y_{\min} = y(-1,2) = -1,2 \cdot \sqrt[3]{0,64} \approx -1,06$   
(касательная в этой точке параллельна оси  $Ox$ ).

Исследуем функцию по второй производной.

$$y'' = \left[ \frac{5x+6}{(x+2)^{2/3}} \right] = \frac{5 \cdot \sqrt[3]{x+2} - (5x+6) \cdot \frac{1}{3 \cdot \sqrt[3]{(x+2)^2}}}{\sqrt[3]{(x+2)^2}} =$$

$$= \frac{15(x+2) - (5x+6)}{3(x+2)\sqrt[3]{x+2}} = \frac{10x+24}{3 \cdot \sqrt[3]{(x+2)^4}}.$$

$y'' = 0$  при  $x = -2,4$ ;  $y''$  не существует при  $x = -2$ .

$x$	$(-\infty; -2,4)$	$-2,4$	$(-2,4; -2)$	$-2$	$(-2; +\infty)$
$y''$	$-$	$0$	$+$	не сущест.	$+$
$y$	$\cap$	перегиб	$\cup$		$\cup$

$$y_{\text{перегиба}} = y(-2,4) = -2,4 \cdot \sqrt[3]{(-2,4)^2} \approx -1,30; \quad y(0) = 0.$$

**Пример 4.2.** Провести полное исследование и построить график функции

$$y = \left( \frac{2x+1}{x+2} \right)^2.$$

Область существования:  $x \neq -2$ .

$y(x) \neq y(-x) \Rightarrow$  функция общего вида.

$x = -2$  — точка разрыва, т.к. в ней функция не определена.

$$\lim_{x \rightarrow 2-0} \left( \frac{2x+1}{x+2} \right)^2 = \left( \frac{4+1}{-0} \right)^2 = +\infty; \quad \lim_{x \rightarrow 2+0} \left( \frac{2x+1}{x+2} \right)^2 = \left( \frac{4+1}{+0} \right)^2 = +\infty$$

$\Rightarrow x = 2$  – вертикальная асимптота.

Наклонные асимптоты при  $x \rightarrow \pm \infty$  ищем в виде:  $y = kx + b$ .

$$k = \lim_{x \rightarrow \pm \infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm \infty} \frac{1}{x} \cdot \left( \frac{2x+1}{x+2} \right)^2 = 0;$$

$$b = \lim_{x \rightarrow \pm \infty} [f(x) - kx] = \lim_{x \rightarrow \pm \infty} \left( \frac{2x+1}{x+2} \right)^2 = 4.$$

При  $x \rightarrow \pm \infty$  получаем асимптоту  $y = 4$ .

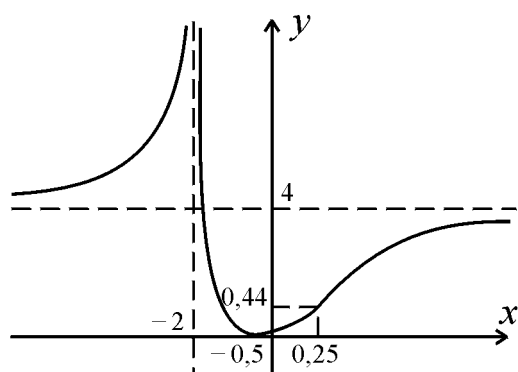
Исследуем функцию по первой производной.

$$y' = 2 \cdot \left( \frac{2x+1}{x+2} \right) \cdot \frac{2(x+2) - (2x+1)}{(x+2)^2} = \frac{6(2x+1)}{(x+2)^2};$$

$$y' = 0 \Rightarrow 2x+1 = 0, \quad x = -0,5;$$

$$y' \text{ не существует} \Rightarrow x = -2.$$

$x$	$(-\infty; -2)$	$(-2; -0,5)$	$-0,5$	$(-0,5; +\infty)$
$y'$	+	-	0	+



$y$			min	
-----	--	--	-----	--

$$y_{\min} = y(-0,5) = 0.$$

Исследуем функцию по второй производной.

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

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

$$y'' = 0 \Rightarrow 1 - 4x = 0; \quad x = 0,25;$$

$$y'' \text{ не существует} \Rightarrow x = -2.$$

$x$	$(-\infty; -2)$	$(-2; 0,25)$	$0,25$	$(0,25; +\infty)$
$y''$	$+$	$+$	$0$	$-$
$y$	$\cup$	$\cup$	перегиб	$\cap$

$$y_{\text{перегиба}} = y(0,25) = \left(\frac{1,5}{2,25}\right)^2 = \frac{4}{9} \approx 0,44.$$

**Пример 4.3.** Провести полное исследование и построить график функции

$$y = \frac{e^{x-3}}{x-3}.$$

Область существования:  $x - 3 \neq 0; \quad x \neq 3.$

$y(x) \neq y(-x)$  – функция общего вида.

В точке  $x = 3$  функция терпит разрыв, т.к. в ней она не определена.

$$\left. \begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 3-0} \frac{e^{x-3}}{x-3} &= -\infty, \\ \lim_{x \rightarrow 3+0} \frac{e^{x-3}}{x-3} &= +\infty \end{aligned} \right\} \Rightarrow x = 3 - \text{вертикальная асимптота.}$$

Наклонные асимптоты ищем в виде:  $y = kx + b.$

1)  $x \rightarrow +\infty,$

$$\begin{aligned} k &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{x-3}}{x^2 - 3x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(e^{x-3})'}{(x^2 - 3x)'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{x-3}}{2x - 3} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(e^{x-3})'}{(2x - 3)'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{x-3}}{2} = +\infty, \text{ следовательно, при } x \rightarrow +\infty \end{aligned}$$

наклонных асимптот нет.

2)  $x \rightarrow -\infty,$

$$k = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{e^{x-3}}{x^2 - 3x} = \frac{0}{+\infty} = 0;$$




$$b = \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - kx] = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{e^{x-3}}{x - 3} = 0,$$

при  $x \rightarrow -\infty$  получаем асимптоту  $y = 0$ .

Исследуем функцию по первой производной.

$$y' = \left( \frac{e^{x-3}}{x-3} \right)' = \frac{e^{x-3} \cdot (x-3) - e^{x-3}}{(x-3)^2} = e^{x-3} \cdot \frac{x-3-1}{(x-3)^2} = e^{x-3} \cdot \frac{x-4}{(x-3)^2},$$

$$y' = 0 \Rightarrow x-4=0, x=4; \quad y' \text{ не существует} \Rightarrow x=3.$$

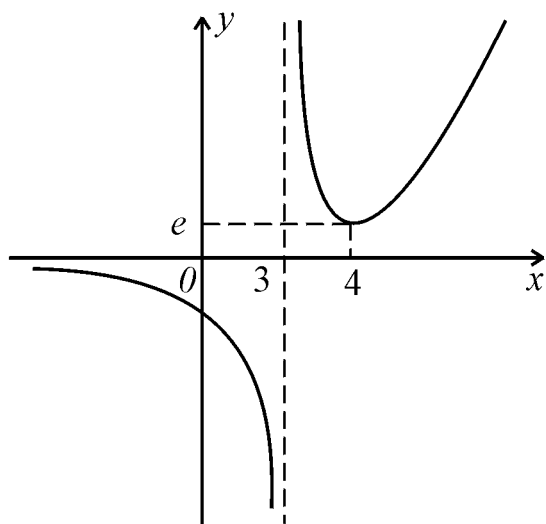
$x$	$(-\infty; 3)$	$(3; 4)$	4	$(4; +\infty)$
$y'$	-	-	0	+
$y$			min	

$$y_{\min} = y(4) = e \approx 2,72.$$



Исследуем функцию по второй производной.

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

$$= \frac{e^{x-3}}{(x-3)^2} \cdot \frac{x^2 - 7x + 12 - x + 5}{x-3} = \frac{e^{x-3} \cdot (x^2 - 8x + 17)}{(x-3)^3}; \quad y'' \neq 0;$$



$$y'' \text{ не существует} \Rightarrow x=3.$$

$x$	$(-\infty; 3)$	$(3; +\infty)$
$y''$	-	+
$y$		

$$y(0) = \frac{e^{-3}}{-3} = -\frac{1}{3e^3} \approx -0,02.$$

**Пример 4.4.** Провести полное исследование и построить график функции

$$y = \ln \frac{x+6}{x} - 1.$$

$$\text{Область существования: } \frac{x+6}{x} > 0.$$

$$x > 0, \quad x < -6.$$



Функция общего вида.

$$\lim_{x \rightarrow -6-0} \left[ \ln \frac{x+6}{x} - 1 \right] = -\infty \Rightarrow x = -6 - \text{вертикальная асимптота.}$$

$$\lim_{x \rightarrow -0+0} \left[ \ln \frac{x+6}{x} - 1 \right] = +\infty \Rightarrow x = -0 - \text{вертикальная асимптота.}$$



Наклонные асимптоты ищем в виде:  $y = kx + b$ .

$$k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\ln \frac{x+6}{x} - 1}{x} = 0;$$

$$b = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - kx] = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left[ \ln \frac{x+6}{x} - 1 \right] = -1.$$

При  $x \rightarrow \pm\infty$  получаем асимптоту  $y = -1$ .

Исследуем функцию по первой производной.

$x$	$(-\infty; -6)$	$(0; +\infty)$
$y'$	$-$	$-$
$y$		

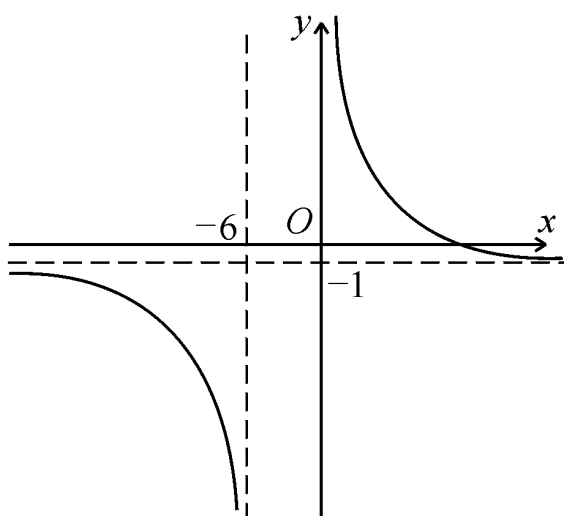
$$y' = \frac{x}{x+6} \cdot \frac{x-x-6}{x^2} = \frac{-6}{x(x+6)} \neq 0.$$

Экстремумов у функции нет.

Исследуем функцию по второй производной.

$$y'' = -6 \cdot \frac{-(x+6+x)}{x^2(x+6)^2} = \frac{6(2x+6)}{x^2(x+6)^2} = \frac{12(x+3)}{x^2(x+6)^2};$$

$$y'' = 0 \Rightarrow x + 3 = 0; \quad x = -3 - \text{не входит в область существования.}$$



$x$	$(-\infty; -6)$	$(0; +\infty)$
$y''$	$-$	$+$
$y$	$\cap$	$\cup$

Точек перегиба нет.

$$\ln \frac{x+6}{x} - 1 = 0 \Rightarrow x = \frac{6}{e-1};$$

$$y\left(\frac{6}{e-1}\right) = 0.$$