

Для линейной параметризации форма дифференциала сохраняется

$$d^2z = \left( \frac{\partial}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial y} dy \right)^2 z \stackrel{\text{инвариант}}{=} z_t^{(n)} dt^n$$

Введем функцию:  $z(x(t), y(t)) \stackrel{\text{обозн}}{=} \varphi(t)$  -  $(n+1)$  раз дифференцируема (композиция  $(n+1)$  дифференцируемых и линейных функций)

Заметим, что  $x = x_0 + \Delta x t \stackrel{t_0=0}{=} x_0$ ,  $y = y_0 + \Delta y t \stackrel{t_0=0}{=} y_0$

$$M \xrightarrow{t \rightarrow t_0=0} M_0$$

То есть  $z(M_0) = z(x_0, y_0) = z(x(t_0), y(t_0)) = \varphi(t_0) = \varphi(0)$

Таким образом  $\varphi(t)$  как функция одной переменной может быть разложена в окрестности  $t_0 = 0$  по формуле Маклорена

$$\varphi(t) = \varphi(0) + \frac{d\varphi(0)}{1!} \Delta t + \dots + \frac{d^n \varphi(0)}{n!} \Delta t^n + o((\Delta t)^n)$$

Вернемся к  $z(x, y)$  ( $\Delta t = t - t_0 = 1$ ):

$$z(x, y) = z(M) = z(M_0) + \frac{dz(M_0)}{1!} + \frac{d^2z(M_0)}{2!} + \dots + \frac{d^n z(M_0)}{n!} + r_n(x, y)$$

$$\text{где } r_n(x, y) = r_n(t) \stackrel{\text{Ларг.}}{=} \frac{\varphi^{(n+1)}(\theta \Delta t)}{(n+1)!} \Delta t = \frac{\varphi^{(n+1)}(\theta \Delta t)}{(n+1)!}$$

$r_n(x, y)$  должен быть б. м. по отношению к  $(\Delta \rho)^n$ , то есть  $r_n(x, y) = o((\Delta \rho)^n)$

$(r_n(t) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0)$ , если  $\varphi(t)$  нужное число раз дифференцируема *Rightarrow* ограничена,  $r_n(t)$  - огр. б. м.)

*Nota.* В дальнейшем для исследования  $z(x, y)$  на экстремум достаточно разложения по формуле Тейлора до 2-ого порядка включительно. Покажем сходимость  $r_n(x, y) \xrightarrow{(\Delta \rho)^n \rightarrow 0} 0$  на

примере  $r_2(x, y) = \frac{d^3 z(M_{\text{сред.}})}{3!}$

$$r_2(x, y) = \frac{1}{3!} \left( \frac{\partial}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y \right)^3 z = \frac{1}{3!} \left( \frac{\partial^3 z}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + 3 \frac{\partial^3 z}{\partial x^2 \partial y} (\Delta x)^2 \Delta y + 3 \frac{\partial^3 z}{\partial x \partial y^2} (\Delta y)^2 \Delta x + \frac{\partial^3 z}{\partial y^3} (\Delta y)^3 \right)$$

Вообще говоря, значения частных производных берутся в различных средних точках

$$r_2(x, y) = \frac{1}{3!} (z_{xxx}(\mu_1)(\Delta x)^3 + 3z_{xxy}(\mu_2)(\Delta x)^2 \Delta y + z_{xyy}(\mu_3)(\Delta y)^2 \Delta x + 3z_{yyy}(\mu_4)(\Delta y)^3) = \left| \text{вынесем } (\Delta \rho)^3 \right.$$

$$= \frac{(\Delta \rho)^3}{3!} \left( \text{огр.} \cdot \frac{(\Delta x)^3}{(\Delta \rho)^3} + \text{огр.} \cdot \frac{(\Delta x)^2 \Delta y}{(\Delta \rho)^3} + \text{огр.} \cdot \frac{(\Delta y)^2 \Delta x}{(\Delta \rho)^3} + \text{огр.} \cdot \frac{(\Delta y)^3}{(\Delta \rho)^3} \right)$$

$$\frac{(\Delta x)^3}{(\Delta \rho)^3} = \frac{(\Delta x)^3}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}^3} \xrightarrow{\Delta x \rightarrow 0} 0, \text{ то есть дробь и выражение выше ограничены}$$

$$\frac{r_2(x, y)}{(\Delta \rho)^2} = \frac{1}{3!} \frac{(\Delta \rho)^3 \cdot \text{огр.}}{(\Delta \rho)^2} = \frac{1}{3!} \Delta \rho \cdot \text{огр.} \xrightarrow{\Delta \rho \rightarrow 0} 0$$

## 4.7. Геометрия ФНП

### 4.7.1. Линии и поверхности уровня

Положим  $z = \text{const}$ . В сечении плоскостью  $z = c$  образуется кривая  $l$  с уравнением  $\begin{cases} z = c \\ \varphi(x, y) = 0 \end{cases} \leftarrow \text{уравнение } l$

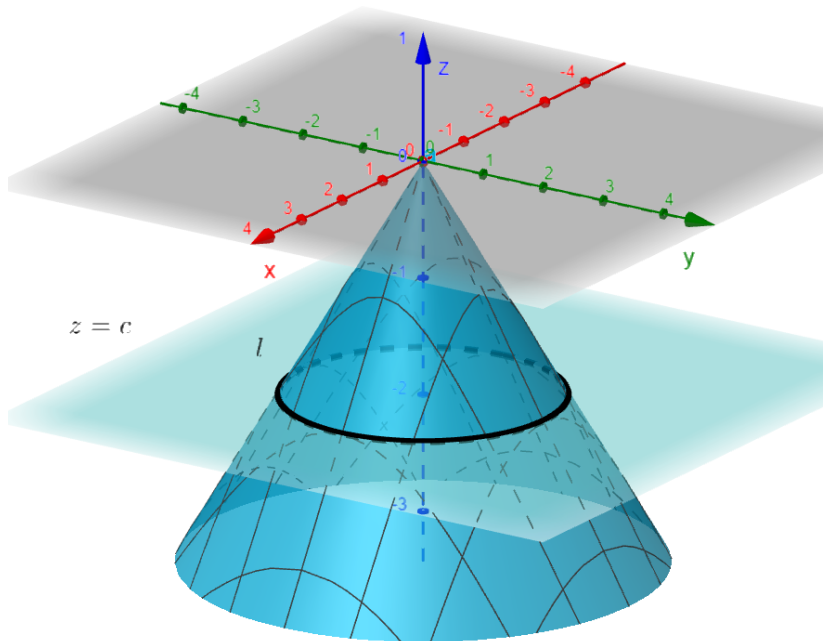
Кривая  $l$  с уравнением  $z(x, y) = c$  называется линией уровня Ф<sub>2</sub>П  $z = z(x, y)$

**Def.** Поверхность уровня  $\mathcal{P}$  - это поверхность с уровнем  $u(x, y, z) = c$

Физ. смысл: Пусть  $u : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  (значения функции  $u(x, y, z)$  - скаляры). Тогда говорят, что в  $\mathbb{R}^3$  задано скалярное поле. Например, поле температур, давления, плотности и т. д.

Тогда  $u = c$  - поверхности постоянных температур, давления и т. п. (изотермические, изобарные, эквипотенциальные)

*Ex.* Конус -  $z = -\sqrt{x^2 + y^2}$



Линии уровня  $z = c$ :

1.  $c > 0$   $\emptyset$
2.  $c = 0$   $x = y = 0$  - точка  $(0, 0)$
3.  $c < 0$   $-|c| = -\sqrt{x^2 + y^2}$   $c^2 = x^2 + y^2$

### 4.7.2. Производная по направлению, Градиент

Задача. Дано скалярное поле  $u = u(x, y, z)$  (напр. давления). Как меняется давление при перемещении в заданном направлении?

Это задача о нахождении скорости изменения  $u(x, y, z)$  в заданном направлении  $\vec{s}$

Из  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  движемся в  $M(x, y, z)$  в направлении  $\vec{s}$ ,  $x = x_0 + \Delta x$ ,  $y = y_0 + \Delta y$ ,  $z = z_0 + \Delta z$

$$\Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad \Big| \cdot \frac{1}{\Delta s}$$

$$1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\Delta s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{\Delta s}\right)^2}$$

$$\left(\frac{\Delta x}{\Delta s}, \frac{\Delta y}{\Delta s}, \frac{\Delta z}{\Delta s}\right) = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) = \vec{s}^0$$

Потребуем, чтобы  $u(x, y, z)$  имела непрерывность  $u_x, u_y, u_z$  в  $D$

То есть  $u(x, y, z)$  дифференцируема и

$$\Delta u = du + o(\Delta s) = u_x \Delta x + u_y \Delta y + u_z \Delta z + o(\Delta s) \quad \Big| \cdot \frac{1}{\Delta s}$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta s} = u_x \cos \alpha + u_y \cos \beta + u_z \cos \gamma + \frac{o(\Delta s)}{\Delta s} \quad - \text{предельный переход}$$

$$\frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \gamma$$

$$\text{Nota. Изначально } \Delta u = du + (\text{б. м.})\Delta x + (\text{б. м.})\Delta y + (\text{б. м.})\Delta z \quad \Big| \cdot \frac{1}{\Delta s}$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta s} = \frac{du}{\Delta s} + (\text{б. м.}) \cos \alpha, (\text{б. м.}) \cos \alpha \rightarrow 0$$

$$\text{Def. } \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \gamma$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  - направления  $\vec{s}$ , называют производной функции  $u = u(x, y, z)$  в направлении  $\vec{s}$

Nota. Производная в определении - число, но  $\frac{\partial u}{\partial s} \vec{s}^0$  - вектор скорости

Nota. Заметим, что если  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  - декартовы орты, то

$$\frac{\partial u}{\partial i} = \frac{\partial u}{\partial x} 1 + \frac{\partial u}{\partial y} 0 + \frac{\partial u}{\partial z} 0 = \frac{\partial u}{\partial x}$$

и аналогично в других направлениях:  $\frac{\partial u}{\partial j} = \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial k} = \frac{\partial u}{\partial z}$

Составим вектор  $\frac{\partial u}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{k} \stackrel{\text{обозн}}{=} \vec{\nabla} u$

$\vec{\nabla}$  - набла-оператор (оператор Гамильтона);  $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z}\right)$  - условный вектор

Def.  $\vec{\text{grad}} u \stackrel{\text{def}}{=} \vec{\nabla} u$  - называют градиентом функции  $u(x, y, z)$

Свойства градиентов:

$$\text{Th. 1. } \frac{\partial u}{\partial s} = \text{пр.}_{\vec{s}} \vec{\nabla} u$$

Th. 2.  $\vec{\nabla} u$  - направление наибольшего значения  $\frac{\partial u}{\partial s}$

$$\text{Th. 3. } \vec{s} \perp \vec{\nabla} u \implies \frac{\partial u}{\partial s} = 0$$

Th. 4.  $u = u(x, y), u = c$  - линии уровня  $l$ . Тогда  $\vec{\nabla} u \perp l$

Доказательства:

1.  $\frac{\partial u}{\partial s} = \left( \frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \vec{s}^0 = \vec{\nabla} u \vec{s}^0 = |\vec{\nabla} u| |\vec{s}^0| \cos(\vec{\nabla} u, \vec{s}^0) = |\vec{\nabla} u| \cos(\vec{\nabla} u, \vec{s}^0) = \text{пр.}_{\vec{s}} \vec{\nabla} u$
2.  $\frac{\partial u}{\partial s} = |\vec{\nabla} u| \cos \varphi \dots$  Lab.
3. Lab.
4.  $u = c$  - уравнение  $l_{\text{пр}}$  в плоскости  $Oxy$ , то есть  $u(x, y) = c$ , можем рассмотреть как неявную функцию  $u(x, y(x)) - c = 0$

Производная неявной функции:  $\frac{dy}{dx} = -\frac{u_x}{u_y} = k_l$  - угловой коэффициент касательной к  $l$

$\vec{\nabla} u = (u_x, u_y)$   $\frac{u_y}{u_x} = k_{\text{град.}}$  - наклон вектора градиента. Очевидно  $k_l \cdot k_{\text{град.}} = -1 \implies \vec{\nabla} u \perp l$