

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
Факультет "Фундаментальные науки"
Кафедра "Высшая математика"

Математический анализ
Модуль 3. Дифференциальное исчисление
функций одной переменной
Лекция 3.2

к.ф.-м.н. Семакин А.Н.



Производная в экстремальных точках



Производная в экстремальных точках

*Теорема (теорема Ферма)**



Производная в экстремальных точках

*Теорема (теорема Ферма)**

Если функция определена в некоторой окрестности точки c , принимает в этой точке наибольшее или наименьшее значение и имеет в ней конечную или определенного знака бесконечную производную, то эта производная равна нулю.



Производная в экстремальных точках

Доказательство



Производная в экстремальных точках

Доказательство

Пусть функция $f(x)$ определена в окрестности $U(c)$ точки c и принимает в этой точке наибольшее значение.



Производная в экстремальных точках

Доказательство

Пусть функция $f(x)$ определена в окрестности $U(c)$ точки c и принимает в этой точке наибольшее значение.

Тогда $\forall x \in U(c) \ f(x) \leq f(c)$.



Производная в экстремальных точках

Соответственно,



Производная в экстремальных точках

Соответственно,
если $x < c$, то $\frac{f(x) - f(c)}{x - c} \geq 0$ (1)



Производная в экстремальных точках

Соответственно,

если $x < c$, то
$$\frac{f(x) - f(c)}{x - c} \geq 0 \quad (1)$$

если $x > c$, то
$$\frac{f(x) - f(c)}{x - c} \leq 0 \quad (2)$$



Производная в экстремальных точках

Соответственно,

$$\text{если } x < c, \text{ то } \frac{f(x) - f(c)}{x - c} \geq 0 \quad (1)$$

$$\text{если } x > c, \text{ то } \frac{f(x) - f(c)}{x - c} \leq 0 \quad (2)$$

Перейдя к пределу в данных неравенствах при $x \rightarrow c$, получим



Производная в экстремальных точках

Соответственно,

$$\text{если } x < c, \text{ то } \frac{f(x) - f(c)}{x - c} \geq 0 \quad (1)$$

$$\text{если } x > c, \text{ то } \frac{f(x) - f(c)}{x - c} \leq 0 \quad (2)$$

Перейдя к пределу в данных неравенствах при $x \rightarrow c$, получим

$$(1) \Rightarrow f'(c) \geq 0$$



Производная в экстремальных точках

Соответственно,

если $x < c$, то
$$\frac{f(x) - f(c)}{x - c} \geq 0 \quad (1)$$

если $x > c$, то
$$\frac{f(x) - f(c)}{x - c} \leq 0 \quad (2)$$

Перейдя к пределу в данных неравенствах при $x \rightarrow c$, получим

$$(1) \Rightarrow f'(c) \geq 0$$

$$(2) \Rightarrow f'(c) \leq 0$$



Производная в экстремальных точках

Соответственно,

$$\text{если } x < c, \text{ то } \frac{f(x) - f(c)}{x - c} \geq 0 \quad (1)$$

$$\text{если } x > c, \text{ то } \frac{f(x) - f(c)}{x - c} \leq 0 \quad (2)$$

Перейдя к пределу в данных неравенствах при $x \rightarrow c$, получим

$$\begin{aligned} (1) &\Rightarrow f'(c) \geq 0 \\ (2) &\Rightarrow f'(c) \leq 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow f'(c) = 0. \quad \blacksquare$$



Теоремы о средних значениях



Теоремы о средних значениях

*Теорема (теорема Ролля)**



Теоремы о средних значениях

Теорема (теорема Ролля)*

Пусть функция $f(x)$ удовлетворяет условиям:

- 1) непрерывна на отрезке $[a, b]$,
- 2) имеет на интервале (a, b) конечную или определенного знака бесконечную производную,
- 3) $f(a) = f(b)$.

Тогда $\exists c \in (a, b) : f'(c) = 0$.



Теоремы о средних значениях

Доказательство



Теоремы о средних значениях

Доказательство

Поскольку $f(x) \in C[a, b]$, то она достигает на $[a, b]$ своего наибольшего M и наименьшего m значений по теореме Вейерштрасса для функции, непрерывной на отрезке.



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

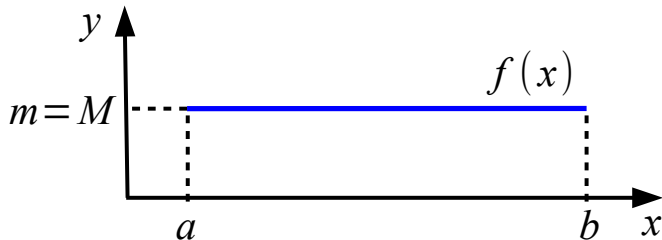
1) $m = M$



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

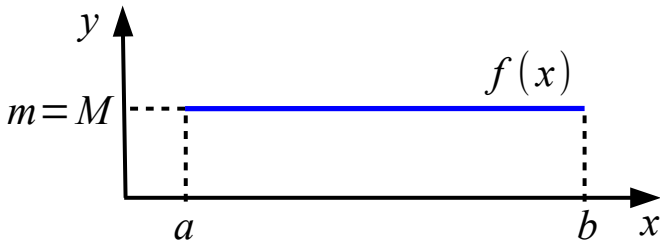
1) $m = M$



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

1) $m = M$



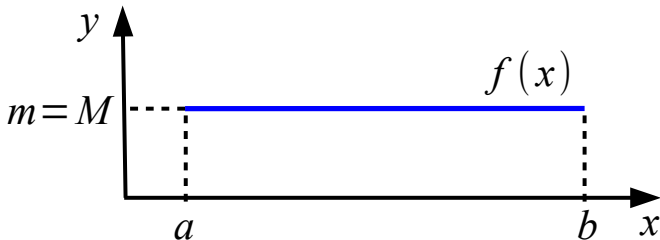
Тогда $f(x) = \text{const}$



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

1) $m = M$



Тогда $f(x) = \text{const} \Rightarrow \forall x \in (a, b) : f'(x) = 0$



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

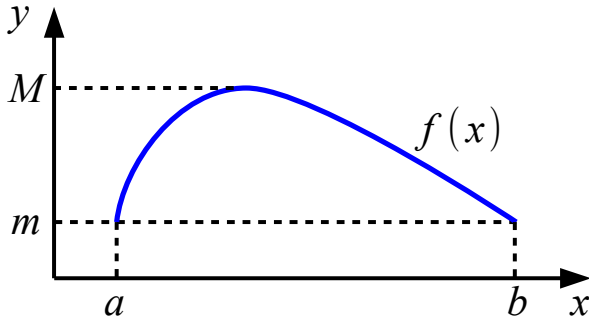
2) $m \neq M$



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

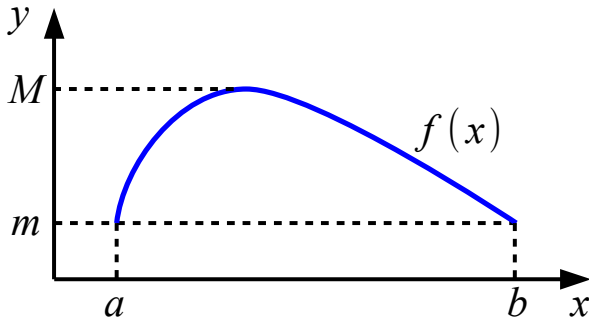
2) $m \neq M$



Теоремы о средних значениях

Возможны случаи:

2) $m \neq M$



Так как $f(a) = f(b)$, то m или M достигаются на интервале (a, b) .



Теоремы о средних значениях

Пусть M достигается на (a, b) , т.е.
 $M = f(c), c \in (a, b)$.



Теоремы о средних значениях

Пусть M достигается на (a, b) , т.е.

$M = f(c)$, $c \in (a, b)$. Тогда по теореме Ферма $f'(c) = 0$. ■



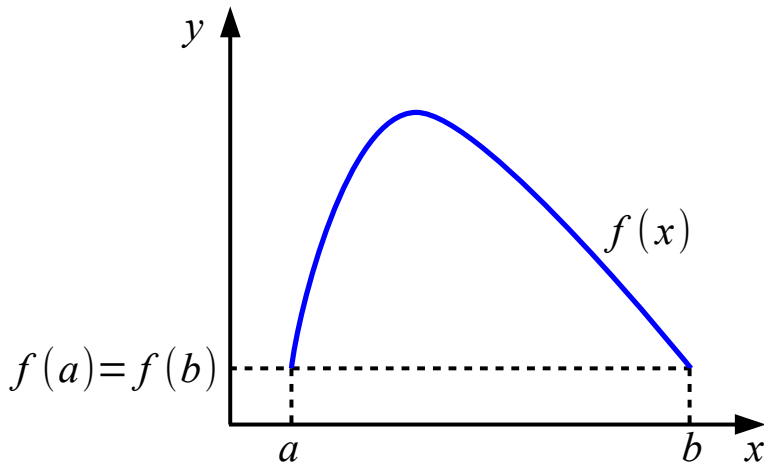
Теоремы о средних значениях

Геометрическая интерпретация теоремы:



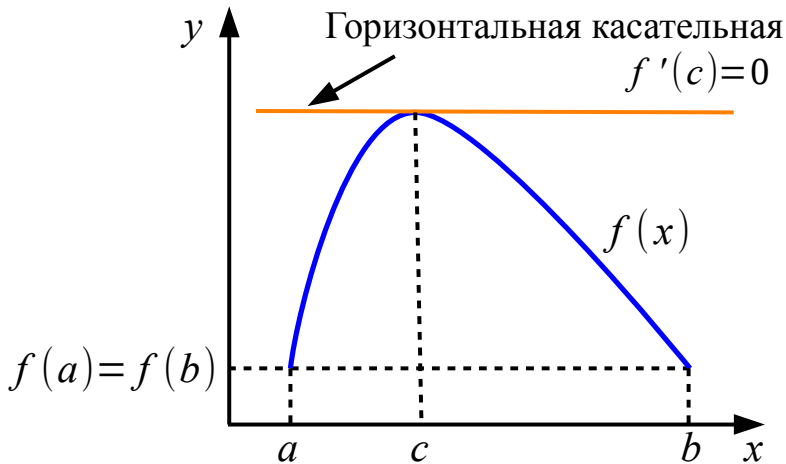
Теоремы о средних значениях

Геометрическая интерпретация теоремы:



Теоремы о средних значениях

Геометрическая интерпретация теоремы:



Теоремы о средних значениях

Если функция $f(x)$ удовлетворяет всем условиям теоремы Ролля, то на интервале (a, b) существует точка, в которой эта функция имеет горизонтальную касательную.



Теоремы о средних значениях

*Теорема (теорема Лагранжа, теорема о конечных приращениях)**



Теоремы о средних значениях

*Теорема (теорема Лагранжа, теорема о конечных приращениях)**

Если функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$ и в каждой точке интервала (a, b) имеет конечную или определенного знака бесконечную производную, то

$$\exists c \in (a, b) : \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = f'(c)$$



Теоремы о средних значениях

Доказательство



Теоремы о средних значениях

Доказательство

Рассмотрим вспомогательную функцию

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a).$$



Теоремы о средних значениях

Доказательство

Рассмотрим вспомогательную функцию

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a).$$

Функция $F(x)$ удовлетворяет всем условиям теоремы Ролля.



Теоремы о средних значениях

Доказательство

Рассмотрим вспомогательную функцию

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a).$$

Функция $F(x)$ удовлетворяет всем условиям теоремы Ролля.

$$\Rightarrow \exists c \in (a, b) : F'(c) = 0.$$



Теоремы о средних значениях

$$F'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a},$$



Теоремы о средних значениях

$$F'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a},$$
$$F'(c) = f'(c) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$



Теоремы о средних значениях

$$F'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a},$$
$$F'(c) = f'(c) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = 0.$$



Теоремы о средних значениях

$$F'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a},$$
$$F'(c) = f'(c) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = 0.$$
$$\Rightarrow f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}. \blacksquare$$



Теоремы о средних значениях

Теорема (теорема Коши)



Теоремы о средних значениях

Теорема (теорема Коши)

Пусть функции f и g

- 1) непрерывны на отрезке $[a, b]$,
- 2) имеют производные в каждой точке интервала (a, b) ,
- 3) $g' \neq 0$ во всех точках интервала (a, b) .

Тогда

$$\exists c \in (a, b) : \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}.$$



Правило Лопиталя



Правило Лопиталя

Правило Лопиталя - это способ нахождения пределов функций через их производные.



Правило Лопиталя

Правило Лопиталя - это способ нахождения пределов функций через их производные.
Рассмотрим частный случай раскрытия неопределенности $\left(\frac{0}{0}\right)$



Правило Лопиталя

*Теорема (правило Лопиталя)**



Правило Лопиталя

Теорема (правило Лопиталя)*

Пусть функции $f(x)$ и $g(x)$

1) непрерывны и дифференцируемы на интервале (a, b) ,

$$2) \lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = \lim_{x \rightarrow a+0} g(x) = 0,$$

$$3) \forall x \in (a, b) : g'(x) \neq 0,$$

$$4) \exists \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = K.$$

$$\text{Тогда } \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$



Правило Лопиталя

Доказательство



Правило Лопиталя

Доказательство

Доопределим функции $f(x)$ и $g(x)$ в точке $x = a$, положив $f(a) = g(a) = 0$.



Правило Лопиталя

Доказательство

Доопределим функции $f(x)$ и $g(x)$ в точке $x = a$, положив $f(a) = g(a) = 0$. В этом случае функции $f(x)$ и $g(x)$ становятся непрерывными в точке a .



Правило Лопиталя

Доказательство

Доопределим функции $f(x)$ и $g(x)$ в точке $x = a$, положив $f(a) = g(a) = 0$. В этом случае функции $f(x)$ и $g(x)$ становятся непрерывными в точке a .

$\Rightarrow f(x)$ и $g(x)$ начинают удовлетворять всем условиям теоремы Коши на любом отрезке $[a, x]$, где $a < x < b$.



Правило Лопиталя

$$\Rightarrow \exists c(x) \in (a, x) : \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} =$$



Правило Лопиталя

$$\Rightarrow \exists c(x) \in (a, x) : \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))}. \quad (1)$$



Правило Лопиталя

$$\Rightarrow \exists c(x) \in (a, x) : \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))}. \quad (1)$$

Так как $a < c < x$, то $\lim_{x \rightarrow a+0} c = a$.



Правило Лопиталя

$$\Rightarrow \exists c(x) \in (a, x) : \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))}. \quad (1)$$

Так как $a < c < x$, то $\lim_{x \rightarrow a+0} c = a$.

Тогда по теореме о замене переменной в пределе имеем:



Правило Лопиталя

$$\Rightarrow \exists c(x) \in (a, x) : \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))}. \quad (1)$$

Так как $a < c < x$, то $\lim_{x \rightarrow a+0} c = a$.

Тогда по теореме о замене переменной в пределе имеем:

$$K = \lim_{c \rightarrow a+0} \frac{f'(c)}{g'(c)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))}.$$



Правило Лопиталя

\Rightarrow по равенству (1)

$$\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))} = K.$$



Правило Лопиталя

\Rightarrow по равенству (1)

$$\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))} = K.$$

По условию 4 теоремы $\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = K.$



Правило Лопиталя

\Rightarrow по равенству (1)

$$\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(c(x))}{g'(c(x))} = K.$$

По условию 4 теоремы $\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = K.$

$$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} \blacksquare$$



Правило Лопиталя

Общий случай:



Правило Лопиталя

Общий случай:

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \left(\frac{0}{0}, \frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)},$$

где a - это конечное число или одна из бесконечностей.



Порядок роста функций



Порядок роста функций

Определение

Говорят, что бесконечно большая при $x \rightarrow a$ функция $f(x)$ имеет **более высокий порядок роста**, чем бесконечно большая при $x \rightarrow a$ функция $g(x)$, если

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \infty$$



Порядок роста функций

Примеры:



Порядок роста функций

Примеры:

$$1) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$1) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right)$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$1) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x^n)'}{(\ln x)'}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 1) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x^n)'}{(\ln x)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{nx^{n-1}}{1/x} \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 1) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x^n)'}{(\ln x)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{nx^{n-1}}{1/x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} nx^n \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 1) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x^n)'}{(\ln x)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{nx^{n-1}}{1/x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} nx^n = +\infty \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$2) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$2) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right)$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$2) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x \ln a)'}{(n x^{n-1})'} \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x \ln a)'}{(n x^{n-1})'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln^2 a}{n(n-1)x^{n-2}} \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x \ln a)'}{(n x^{n-1})'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln^2 a}{n(n-1)x^{n-2}} = \dots \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x \ln a)'}{(n x^{n-1})'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln^2 a}{n(n-1)x^{n-2}} = \dots = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln^n a}{n!} \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Примеры:

$$\begin{aligned} 2) \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} &= \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x)'}{(x^n)'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln a}{n x^{n-1}} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(a^x \ln a)'}{(n x^{n-1})'} = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln^2 a}{n(n-1)x^{n-2}} = \dots = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x \ln^n a}{n!} = +\infty, \quad a > 1 \end{aligned}$$



Порядок роста функций

Показательная функция растет быстрее степенной, а степенная функция растет быстрее логарифмической.



Порядок роста функций

