

## Содержание

<b>1. Теорема Больцано-Вейерштрасса и критерий Коши сходимости числовой последовательности .....</b>	<b>2</b>
1.1. Теорема Больцано-Вейерштрасса .....	2
1.2. Критерий Коши .....	4
<b>2. Ограниченность функции, непрерывной на отрезке, достижение точных верхней и нижней граней .....</b>	<b>4</b>
2.1. Ограниченность функции, непрерывной на отрезке .....	4
2.2. Достижение точных верхних и нижних граней .....	5

# ГОС по матану

Disclaimer: доверять этому конспекту или нет выбирайте сами

## 1. Теорема Больцано-Вейерштрасса и критерий Коши сходимости числовой последовательности

### 1.1. Теорема Больцано-Вейерштрасса

**Определение 1.1.1:** Если  $E \subset \mathbb{R}$  – ограниченное сверху (снизу) множество, то  $M(m) \in \mathbb{R}$  такое, что

$$\forall x \in E : x \leq M (x \geq m)$$

называется **верхней (нижней) гранью** множества  $E$ .

**Определение 1.1.2:** Наименьшая из верхних граней множества  $E$  называется **точной верхней гранью**:  $\sup E$ .

Наибольшая из нижних граней множества  $E$  называется **точной нижней гранью**:  $\inf E$ .

**Теорема 1.1.1** (О существовании точной верхней (нижней) грани): Любое ограниченное сверху (снизу) непустое множество  $E \subset \mathbb{R}$  имеет точную верхнюю (нижнюю) грань.

*Доказательство:* Пусть  $B$  – множество верхних граней множества  $E$ . Введём обозначение  $A := \mathbb{R} \setminus B$ .

Тогда если произвольное число  $a$  меньше какого-то  $x \in E$ , то оно точно не верхняя грань  $E \Rightarrow a \in A$ .

Заметим также свойство множества  $B$ :

$$\forall b \in B : \forall x > b : x \in B$$

Тогда по одной из аксиом действительных чисел

$$\exists c \in \mathbb{R} : \forall a \in A : \forall b \in B : a \leq c \leq b$$

Пусть  $\sup E := c$ . Проверим свойства точной верхней грани:

1.  $c$  является верхней гранью

От противного. Пусть  $c \notin B$ , тогда  $\exists x \in B : x > c$ , причём  $c < \frac{x+c}{2} < x$ .

Но тогда заметим, что  $\frac{x+c}{2} \in A$ , что противоречит выбору  $c$  как числа больше либо равного любого элемента  $A$

2.  $c$  является наименьшей из верхних граней

От противного. Пусть  $\exists M \in B : M < c$ . Но тогда  $M < \frac{M+c}{2} < c$ , причём  $\frac{M+c}{2} \in B$ , что противоречит выбору  $c$  как числа меньше либо равного любого элемента  $B$ .

□

**Теорема 1.1.2** (Вейерштрасса): Каждая ограниченная сверху (снизу) неубывающая (невозрастающая) последовательность сходится, причём её предел равен точной верхней (нижней) грани.

*Доказательство:*  $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$  ограничена сверху  $\Rightarrow \exists \sup \{x_n\}_{n=1}^{\infty} = l$

Отсюда:

1.  $\forall n \in \mathbb{N} : x_n \leq l < l + \varepsilon$
2.  $\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : l - \varepsilon < x_N$  (по определению супремума)

Заметим, что получилось в точности определение предела. □

**Теорема 1.1.3** (Принцип Кантора вложенных отрезков): Всякая последовательность вложенных отрезков  $\{[a_n, b_n]\}_{n=1}^{\infty}$ , то есть

$$\forall n \in \mathbb{N} : [a_n, b_n] \supset [a_{n+1}, b_{n+1}]$$

имеет непустое пересечение, то есть

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} [a_n, b_n] \neq \emptyset$$

*Доказательство:* Из вложенности очевидно следует

$$\forall n \in \mathbb{N} : a_{n+1} \geq a_n, b_{n+1} \leq b_n$$

Тогда заметим, что

$$\forall n \in \mathbb{N} : a_n \leq b_1, b_n \geq a_1$$

Тогда по теореме Вейерштрасса:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup \{a_n\}_{n=1}^{\infty} = a$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \inf \{b_n\}_{n=1}^{\infty} = b$$

А значит отрезок  $[a, b]$  (возможно вырожденный) включён в пересечение всех отрезков. □

**Теорема 1.1.4** (Больцано-Вейерштрасса): Из каждой ограниченной последовательности можно выделить сходящуюся подпоследовательность.

*Доказательство:* Пусть  $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$  – рассматриваемая ограниченная последовательность, то есть

$$\exists a_1, b_1 \in \mathbb{R} : \forall n \in \mathbb{N} : a_1 \leq x_n \leq b_1$$

Заметим, что один из отрезков  $[a_1, \frac{a_1+b_1}{2}]$ ,  $[\frac{a_1+b_1}{2}, b_1]$  содержит бесконечно много элементов последовательности.

Пусть  $[a_2, b_2]$  – тот из отрезков, который содержит бесконечно много элементов.

Продолжая данный трюк счётное количество раз получим последовательность вложенных отрезков  $\{[a_n, b_n]\}_{n=1}^{\infty}$ . Также заметим, что данные отрезки стягиваются:

$$0 < b_n - a_n = \frac{b_1 - a_1}{2^n}$$

Тогда по принципу Кантора:

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} [a_n, b_n] = \{c\}$$

Осталось построить подпоследовательность, будем брать  $x_{n_k} \in [a_k, b_k]$ , причём так, чтобы  $n_k > n_{k-1}$ . Очевидно,  $n_1 = 1$ . Существование предела также очевидно:

$$0 \leq |c - x_{n_k}| \leq b_k - a_k = \frac{b_1 - a_1}{2^k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

□

## 1.2. Критерий Коши

**Определение 1.2.1:** Последовательность  $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$  называется фундаментальной, если

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N : \forall p \in \mathbb{N} : |x_{n+p} - x_n| < \varepsilon$$

**Теорема 1.2.1** (Критерий Коши сходимости числовой последовательности): Числовая последовательность сходится  $\Leftrightarrow$  она фундаментальна.

*Доказательство:*  $\Rightarrow$  По определению предела:

$$\exists l \in \mathbb{R} : \forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N : |x_n - l| < \frac{\varepsilon}{2}$$

Тогда по неравенству треугольника в условиях предела:

$$|x_{n+p} - x_n| = |x_{n+p} - l + l - x_n| \leq |x_{n+p} - l| + |x_n - l| < \varepsilon$$

$\Leftarrow$  Вначале докажем, что из фундаментальности следует ограниченность:

$$\varepsilon := 1 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N : \forall p \in \mathbb{N} : |x_{n+p} - x_n| < 1$$

Тогда заметим, что

$$\forall n \in \mathbb{N} : \min(x_1, \dots, x_N, x_{N+1} + 1) \leq x_n \leq \max(x_1, \dots, x_N, x_{N+1} + 1)$$

Тогда из ограниченной последовательности  $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$  по теореме Больцано-Вейерштрасса достанем сходящуюся подпоследовательность:

$$\exists \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : \exists l : \forall \varepsilon > 0 : \exists K(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall k > K(\varepsilon) : |x_{n_k} - l| < \frac{\varepsilon}{2}$$

Также по определению фундаментальности:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall n > N(\varepsilon) : \forall p \in \mathbb{N} : |x_{n+p} - x_n| < \varepsilon$$

Объединим эти два условия и получим требуемое:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N_0 = \max(N(\varepsilon), n_{K(\varepsilon)+1}) : \forall n > N_0 :$$

$$|x_n - l| = |x_n - x_{n_{K(\varepsilon)+1}} + x_{n_{K(\varepsilon)+1}} - l| \leq |x_n - x_{n_{K(\varepsilon)+1}}| + |x_{n_{K(\varepsilon)+1}} - l| < \varepsilon$$

□

## 2. Ограниченность функции, непрерывной на отрезке, достижение точных верхней и нижней граней

### 2.1. Ограниченность функции, непрерывной на отрезке

**Определение 2.1.1:** Пусть  $f$  определена в некоторой окрестности  $U_{\delta_0}(x_0)$ , где  $x_0 \in \mathbb{R}$ . Если  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$ , то функция называется **непрерывной в точке  $x_0$** .

**Определение 2.1.2:**  $f$  называется **непрерывной на множестве  $X \subset \mathbb{R}$** , если

$$\forall x_0 \in X : \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in X, |x - x_0| < \delta : |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$$

**Теорема 2.1.1** (Первая теорема Вейерштрасса о непрерывной на отрезке функции): Если  $f$  непрерывна на  $[a, b]$ , то  $f$  ограничена на  $[a, b]$ .

*Доказательство:* От противного, пусть  $f$  неограничена сверху. Тогда

$$\sup_{x \in [a, b]} f(x) = +\infty$$

То есть

$$\forall n \in \mathbb{N} : \exists x_n \in [a, b] : f(x_n) > n$$

Причём  $\forall n \in \mathbb{N} : a \leq x_n \leq b$ , то есть  $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$  – ограниченная, тогда по теореме Больцано-Вейерштрасса

$$\exists \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(x_0)$$

Однако из  $f(x_n) > n$  следует, что  $f(x_0) = \infty$ . Противоречие.  $\square$

## 2.2. Достижение точных верхних и нижних граней

**Теорема 2.2.1** (Вторая теорема Вейерштрасса о непрерывных на отрезке функциях): Если  $f$  непрерывна на  $[a, b]$ , то

$$\exists x', x'' \in [a, b] : f(x') = \sup_{x \in [a, b]} f(x); \quad f(x'') = \inf_{x \in [a, b]} f(x)$$

*Доказательство:* Пусть  $M = \sup_{x \in [a, b]} f(x)$ . Тогда по определению супремума

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists x \in [a, b] : M - \varepsilon < f(x) \leq M$$

В том числе для  $\{\varepsilon_n\}_{n=1}^{\infty} = \{\frac{1}{n}\}_{n=1}^{\infty}$ :

$$\exists \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset [a, b] : \forall n \in \mathbb{N} : M - \frac{1}{n} < f(x_n) \leq M$$

Тогда по теореме Больцано-Вейерштрасса:

$$\exists \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(x_0) = M$$

Последнее равенство было получено устремлением  $k \rightarrow \infty$  в неравенстве  $M - \frac{1}{n_k} < f(x_{n_k}) \leq M$ .

Таким образом,  $M$  действительно достигим функцией  $f$  в точке  $x_0$ . Для инфимума аналогично.  $\square$