

# Математический анализ-3

Лектор: проф. Подольский Владимир Евгеньевич

4 ноября 2025 г.



Конспект: Кирилл Яковлев, 208 группа

Контакты: [Telegram](#), [GitHub](#)

# Содержание

<b>1</b>	<b>Числовые ряды</b>	<b>3</b>
1.1	Определение ряда и простейшие свойства . . . . .	3
1.2	Знакопостоянные ряды . . . . .	4
1.3	Знакопеременные ряды . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Функциональные последовательности и ряды</b>	<b>20</b>
2.1	Функциональные последовательности . . . . .	20
2.2	Функциональные ряды . . . . .	23
2.3	Степенные ряды . . . . .	26
2.4	Ряды Тейлора . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Бесконечные произведения</b>	<b>32</b>
3.1	Разложение синуса в бесконечное произведение . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Интегралы с параметром</b>	<b>37</b>
4.1	Собственные интегралы с параметром . . . . .	37
4.2	Несобственные интегралы с параметром . . . . .	40

# 1 Числовые ряды

## 1.1 Определение ряда и простейшие свойства

**Определение.** Пара последовательностей

$$a_n, S_n = \sum_{k=1}^n a_k$$

называется числовым рядом и обозначается

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

$a_n$  называется общим членом ряда,  $S_n$  называется частичной суммой ряда.

**Определение.** Если существует предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S$$

то

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

называется сходящимся, а  $S$  - суммой ряда.

**Определение.** Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

тогда ряд

$$r_k = \sum_{n=k+1}^{\infty} a_n$$

называется остаточным рядом.

**Теорема.** (Критерий Коши сходимости ряда)

Ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

сходится тогда и только тогда, когда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_{\varepsilon} \in \mathbb{N}, \forall k, m > N_{\varepsilon} : \left| \sum_{n=k+1}^m a_n \right| < \varepsilon$$

*Доказательство.* По критерию Коши для последовательности  $S_n$ :

$$\left| \sum_{n=k+1}^m a_n \right| = |S_m - S_k| < \varepsilon$$

□

**Теорема.** Пусть даны ряды

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n$$

и они сходятся, тогда  $\forall c, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$  ряды

1.

$$\sum_{n=1}^{\infty} c \cdot a_n = c \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

2.

$$\sum_{n=1}^{\infty} (\alpha \cdot a_n + \beta \cdot b_n) = \alpha \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n + \beta \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b_n$$

также сходятся.

*Доказательство.* Очев.

□

**Теорема.** (Необходимое условие сходимости ряда)

Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

сходится, то  $a_n \rightarrow 0$  при  $n \rightarrow \infty$ .

*Доказательство.* Ряд сходится, значит существует предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (S_n - S_{n-1}) = S - S = 0$$

□

## 1.2 Знакопостоянные ряды

В этом разделе считаем, что  $\forall n \in \mathbb{N} : a_n \geq 0$  или  $a_n \leq 0$ .

**Теорема.** Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \quad a_n \geq 0 \tag{*}$$

Если последовательность  $S_n$  ограничена, то этот ряд сходится.

*Доказательство.* Поскольку  $a_n > 0$ , то последовательность  $S_n$  возрастает. Тогда по теореме Вейерштрасса у  $S_n$  существует предел, значит ряд (\*) сходится.  $\square$

**Теорема.** (Признак сравнения)

Пусть даны ряды

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (a_n \geq 0) \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \quad (b_n \geq 0) \quad (2)$$

и  $a_n \leq b_n$ . Тогда

1. если ряд (2) сходится, то ряд (1) сходится.
2. если ряд (1) расходится, то ряд (2) расходится.

*Доказательство.* Следует из неравенства на частичные суммы

$$\sum_{n=1}^N a_n \leq \sum_{n=1}^N b_n$$

$\square$

**Теорема.** (Признак сравнения в предельной форме)

Пусть даны ряды

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (a_n \geq 0), \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n \quad (b_n > 0)$$

Если существует предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = c > 0$$

то ряды сходятся или расходятся одновременно.

*Доказательство.* Выберем  $\varepsilon > 0$  такой, что

$$0 < c - \varepsilon < \frac{a_n}{b_n} < c + \varepsilon$$

$$(c - \varepsilon) \cdot b_n < a_n < (c + \varepsilon) \cdot b_n$$

по признаку сравнения получаем утверждение теоремы.  $\square$

## Примеры.

1. Ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$$

расходится по Критерию Коши.

2. Ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}}$$

при  $\alpha < 1$  расходится по признаку сравнения с рядом из предыдущего примера.

3. Ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)n} = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = 1$$

сходится.

4. Ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^2}$$

сходится по признаку сравнения с рядом из предыдущего примера.

**Упражнение.** Доказать, что при  $\alpha > 1$  ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}}$$

сходится.

**Теорема.** (Признак Коши)

Пусть дан знакоположительный ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (*)$$

1. Если  $\exists 0 < q < 1, \forall n > N : \sqrt[n]{a_n} \leq q$ , то ряд  $(*)$  сходится.

2. Если  $\exists \{n_k\}_{k=1}^{\infty}$ , что  $\sqrt[n_k]{a_{n_k}} \geq 1$ , то ряд  $(*)$  расходится.

*Доказательство.*

1.  $\sqrt[n]{a_n} \leq q < 1 \Rightarrow a_n \leq q^n \Rightarrow$  ряд  $(*)$  сходится по признаку сравнения с рядом геометрической прогрессии.

2.  $\sqrt[n]{a_{n_k}} \geq 1 \Rightarrow a_n \not\rightarrow 0 \Rightarrow$  ряд (\*) расходится.

□

**Следствие.** (Признак Коши в предельной форме)

1. Если

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = q < 1$$

то ряд (\*) сходится

2. Если

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = q > 1$$

то ряд (\*) расходится

3. Если

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = q = 1$$

то ряд (\*) может как сходиться так и расходиться.

*Доказательство.*

1.  $q < 1$ , значит, начиная с некоторого номера, выполнено:  $\sqrt[n]{a_n} < Q < 1$  следовательно, по утверждению теоремы ряд (\*) сходится.

2.  $q > 1$ , значит, начиная с некоторого номера, выполнено:  $\sqrt[n]{a_n} > 1$  следовательно, по утверждению теоремы ряд (\*) расходится.

3.  $q = 1$ , приведем пример рядов

(a)

$$\sqrt[n]{\frac{1}{n}} \rightarrow 1$$

и ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$$

расходится.

(b)

$$\sqrt[n]{\frac{1}{n^2}} \rightarrow 1$$

и ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$$

сходится.

□

**Теорема.** (Признак Д'Аламбера)

Пусть дан знакоположительный ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (*)$$

1. Если  $\exists 0 < q < 1, \forall n > N : \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq q$ , то ряд  $(*)$  сходится.
2. Если  $\exists \{n_k\}_{k=1}^{\infty} : \frac{a_{n_k+1}}{a_{n_k}} \geq 1$ , то ряд  $(*)$  расходится.

*Доказательство.*

1.  $\forall n > N : a_{n+1} \leq a_n \cdot q$ , значит

$$a_{N+1} \leq a_N \cdot q, \quad a_{N+2} \leq a_{N+1} \cdot q \leq a_N \cdot q^2, \quad \dots$$

таким образом,  $\forall k \in \mathbb{N}$ :

$$a_{N+k} \leq a_N \cdot q^k$$

По признаку сравнения с геометрической прогрессией, ряд

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_{N+k}$$

сходится, значит ряд  $(*)$  также сходится.

2.  $\exists \{n_k\}_{k=1}^{\infty} : \frac{a_{n_k+1}}{a_{n_k}} \geq 1 \Rightarrow a_n \not\rightarrow 0 \Rightarrow$  ряд  $(*)$  расходится.

□

**Следствие.** (Признак Д'Аламбера в предельной форме)

Пусть существует предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = q$$

1. Если  $q < 1$ , то ряд  $(*)$  сходится.
2. Если  $q > 1$ , то ряд  $(*)$  расходится.
3. Если то ряд  $(*)$  может как сходиться так и расходиться.

*Доказательство.*

1.  $q < 1$ , значит, начиная с некоторого номера, выполнено:  $\frac{a_{n+1}}{a_n} < Q < 1$  следовательно, по утверждению теоремы ряд  $(*)$  сходится.



2.  $q > 1$ , значит, начиная с некоторого номера, выполнено:  $\frac{a_{n+1}}{a_n} > 1$  следовательно, по утверждению теоремы ряд (\*) расходится.

3.  $q = 1$ , приведем пример рядов

(a)

$$\frac{\frac{1}{n+1}}{\frac{1}{n}} = \frac{n}{n+1} \rightarrow 1$$

и ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$$

расходится.

(b)

$$\frac{\frac{1}{(n+1)^2}}{\frac{1}{n^2}} = \frac{n^2}{(n+1)^2} \rightarrow 1$$

и ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$$

сходится.

□

**Теорема.** (Интегральный признак)

Пусть  $f(x)$  определена на  $[1, +\infty)$ , монотонно убывает и неотрицательна (монотонно возрастает и неположительна). Тогда ряд и интеграл

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n), \int_1^{\infty} f(x) dx$$

сходятся или расходятся одновременно.

*Доказательство.*  $f(x)$  монотонно убывает, значит  $\forall k \in \mathbb{N}$  и  $x \in [k, k+1]$  :  $f(k) \geq f(x) \geq f(k+1)$ . Проинтегрируем неравенство на этом отрезке:

$$f(k) \geq \int_k^{k+1} f(x) dx \geq f(k+1)$$

теперь для каждого  $k = 1, \dots, N$  сложим полученные неравенства:

$$\sum_{k=1}^N f(k) \geq \int_1^{N+1} f(x) dx \geq \sum_{k=2}^{N+1} f(k)$$

отсюда получаем утверждение теоремы.

□

**Пример.** (Степенно-логарифмическая шкала)

1.

$$\int_1^{\infty} \frac{dx}{x^{\alpha}} \text{ при } \begin{cases} \alpha > 1 - \text{сходится} \\ \alpha \leq 1 - \text{расходится} \end{cases}$$

значит

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}} \text{ при } \begin{cases} \alpha > 1 - \text{сходится} \\ \alpha \leq 1 - \text{расходится} \end{cases}$$

2.

$$\int_2^{\infty} \frac{dx}{x \cdot \ln^{\beta} x} \text{ при } \begin{cases} \beta > 1 - \text{сходится} \\ \beta \leq 1 - \text{расходится} \end{cases}$$

значит

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n \cdot \ln^{\beta} n} \text{ при } \begin{cases} \beta > 1 - \text{сходится} \\ \beta \leq 1 - \text{расходится} \end{cases}$$

3.

$$\int_{10}^{\infty} \frac{dx}{x \cdot \ln x \cdot \ln^{\gamma} (\ln x)} \text{ при } \begin{cases} \gamma > 1 - \text{сходится} \\ \gamma \leq 1 - \text{расходится} \end{cases}$$

значит

$$\sum_{n=10}^{\infty} \frac{1}{n \cdot \ln n \cdot \ln^{\gamma} (\ln n)} \text{ при } \begin{cases} \gamma > 1 - \text{сходится} \\ \gamma \leq 1 - \text{расходится} \end{cases}$$

шкалу можно продолжать дальше.

**Теорема.** (Схема Куммера)

Рассмотрим знакоположительный ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \tag{*}$$

1. Если  $\forall n \geq N$  существует последовательность  $\{c_n\}_{n=N}^{\infty}$ ,  $c_n > 0$  и существует  $\alpha > 0$  такие, что

$$c_n \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - c_{n+1} \geq \alpha$$

то ряд (\*) сходится.

2. Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{c_n}$$

расходится и

$$c_n \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - c_{n+1} \leq 0$$

то ряд (\*) расходится.

*Доказательство.*

1. Рассмотрим неравенства для  $n = N, N + 1, \dots, N + k - 1$ :

$$\begin{cases} c_N \cdot a_N - c_{N+1} \cdot a_{N+1} \geq \alpha \cdot a_{N+1}, \\ \vdots \\ c_{N+k-1} \cdot a_{N+k-1} - c_{N+k} \cdot a_{N+k} \geq \alpha \cdot a_{N+k}. \end{cases}$$

сложив все неравенства, получим

$$c_N \cdot a_N - c_{N+k} \cdot a_{N+k} \geq \alpha \cdot \sum_{m=1}^k a_{N+m}$$

поскольку  $c_{N+k} \cdot a_{N+k} > 0$ , то

$$c_N \cdot a_N \geq \alpha \cdot \sum_{m=1}^k a_{N+m}$$

значит

$$\sum_{m=1}^k a_{N+m} \leq \frac{c_N \cdot a_N}{\alpha}$$

отсюда получаем, что начиная с какого-то номера, частичные суммы ряда ограничены. Значит ряд, поскольку он знакоположительный, сходится.

2.

$$c_n \cdot a_n - c_{n+1} \cdot a_{n+1} \leq 0$$

$$\frac{c_n}{c_{n+1}} \leq \frac{a_{n+1}}{a_n} \Leftrightarrow \frac{\frac{1}{c_{n+1}}}{\frac{1}{c_n}} \leq \frac{a_{n+1}}{a_n}$$

Рассмотрим неравенства для  $n = N, N + 1, \dots, N + k - 1$ :

$$\begin{cases} \frac{\frac{1}{c_{N+1}}}{\frac{1}{c_N}} \leq \frac{a_{N+1}}{a_N} \\ \vdots \\ \frac{\frac{1}{c_{N+k}}}{\frac{1}{c_{N+k-1}}} \leq \frac{a_{N+k}}{a_{N+k-1}} \end{cases}$$

перемножив все неравенства, получим

$$\frac{1}{\frac{c_{N+k}}{\frac{1}{c_N}}} \leq \frac{a_{N+k}}{a_N}$$

$$\frac{1}{c_{N+k}} \leq \frac{1}{a_N \cdot c_N} \cdot a_{N+k}$$

отсюда, по признаку сравнения, ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_{N+k}$$

расходится, значит расходится и ряд (\*).

□

**Примеры.** Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (*)$$

1. (Признак Д'Аламбера)

Возьмем  $c_n = 1$ :

$$1 \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \geq \alpha$$

значит если

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} \geq 1 + \alpha$$

то ряд (\*) сходится. Если

$$1 \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \leq 0$$

значит если

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} \leq 1$$

то ряд (\*) расходится. Запишем в предельной форме:

Если

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} = q > 1$$

то ряд (\*) сходится. Если

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} = q < 1$$

то ряд (\*) расходится.

2. (Признак Раабе)

Возьмем  $c_n = n$ :

$$n \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - (n+1) \geq \alpha$$

Значит если

$$n \cdot \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) \geq 1 + \alpha$$

то ряд (\*) сходится. Теперь

$$n \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - n - 1 \leq 0$$

Значит если

$$n \cdot \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) \leq 1$$

то ряд (\*) расходится. Запишем в предельной форме:

Если

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) = q > 1$$

то ряд (\*) сходится. Если

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) = q < 1$$

то ряд (\*) расходится.

3. (Признак Бертрана, без доказательства, знать формулировку)

Возьмем  $c_n = n \cdot \ln(n)$  Если

$$\left( \ln n \cdot \left( n \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} \right) - 1 \right) - 1 \right) \geq 1 + \alpha$$

то ряд (\*) сходится. Если

$$\left( \ln n \cdot \left( n \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} \right) - 1 \right) - 1 \right) \leq 1$$

то ряд (\*) расходится. Запишем в предельной форме:

Если

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \ln n \cdot \left( n \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} \right) - 1 \right) - 1 \right) = q > 1$$

то ряд (\*) сходится. Если

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \ln n \cdot \left( n \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} \right) - 1 \right) - 1 \right) = q < 1$$

то ряд (\*) расходится.

4. (Признак Гаусса, без доказательства, знать формулировку)

Выводится из признака Бертрана.

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} = \lambda + \frac{\mu}{n} + \frac{\theta_n}{n^{1+\varepsilon}}$$

где  $\theta_n$  - ограниченная последовательность,  $\varepsilon > 0$  - произвольное. Тогда при

(a)  $\lambda > 1 \Rightarrow (*)$  сходится,  $\lambda < 1 \Rightarrow (*)$  - расходится.

(b)  $\lambda = 1 : \mu > 1 \Rightarrow (*)$  сходится,  $\mu < 1 \Rightarrow (*)$  расходится.

(c)  $\lambda = 1, \mu = 1 \Rightarrow (*)$  расходится.

### 1.3 Знакопеременные ряды

**Определение.** Если для ряда

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \tag{1}$$

ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$$

сходится, то ряд (1) называется абсолютно сходящимся.

**Утверждение.** Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

абсолютно сходится, то он сходится.

*Доказательство.* По критерию Коши:

$$\left| \sum_{n=k}^N a_n \right| \leq \sum_{n=k}^N |a_n| < \varepsilon$$

□

**Определение.** Биекция  $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  называется перестановкой натурального ряда.

**Теорема.** Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \tag{1}$$

абсолютно сходится, то для любой перестановки  $\sigma$  натурального ряда, ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)} \quad (2)$$

абсолютно сходится и их суммы равны.

*Доказательство.* Пусть  $a_n \geq 0$ . Рассмотрим

$$S_k^\sigma = \sum_{n=1}^k a_{\sigma(n)}$$

Пусть  $N = \max_{1 \leq n \leq k} \sigma(n)$ ,  $S_n \rightarrow S$ . Тогда

$$S_k^\sigma \leq S_N \Rightarrow S_k^\sigma \leq S \Rightarrow \exists S^\sigma = \lim_{k \rightarrow \infty} S_k^\sigma$$

Используя, что (2) абсолютно сходится, аналогично, поменяв ряды местами, получим:

$$S \leq S^\sigma \Rightarrow S = S^\sigma$$

тогда

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| = \sum_{n=1}^{\infty} |a_{\sigma(n)}|$$

заметим, что

$$a + |a| = \begin{cases} 2a, & a \geq 0, \\ 0, & a < 0. \end{cases}$$

значит

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + |a_n|) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_{\sigma(n)} + |a_{\sigma(n)}|)$$

отсюда

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)}$$

□

**Определение.** Рассмотрим ряды

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n$$

а также всевозможные попарные произведения

$$\{a_n \cdot b_k\}_{n=1, k=1}^{\infty, \infty}$$

Будем записывать ряд по схеме:

$$\begin{array}{cccc}
a_1b_1 & a_1b_2 & a_1b_3 & \cdots \\
\hline
a_2b_1 & a_2b_2 & a_2b_3 & \cdots \\
\hline
a_3b_1 & a_3b_2 & a_3b_3 & \cdots \\
\hline
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots
\end{array}$$

То есть, запишем в порядке:

$$a_1b_1, a_1b_2, a_2b_2, a_2b_1, a_1b_3, a_2b_3, a_3b_3, a_3b_2, a_3b_1, \dots$$

Тогда ряд:

$$\sum_{m=1}^{\infty} (a_nb_k)_m$$

называется произведением рядов по прямоугольной схеме (\*).

**Утверждение.** Пусть два ряда

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = A, \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n = B$$

сходятся абсолютно. Тогда

$$\sum_{m=1}^{\infty} (a_nb_k)_m \quad (*)$$

сходится абсолютно и равен  $AB$ .

*Доказательство.* Рассмотрим подпоследовательность частичных сумм ряда (\*), которые имеют вид  $S_{N^2}$ :

$$S_{N^2} = S_N^a \cdot S_N^b \Rightarrow S_{N^2} \rightarrow AB, \quad N \rightarrow \infty$$

Теперь перейдем к общему виду  $S_{N^2+M}$ , ( $1 \leq M \leq 2N$ ) и покажем, что вклад членов, добавляемых к квадратной частичной сумме, бесконечно мал

$$S_{N^2+M} = S_{N^2} + \sum_{m=N^2+1}^{N^2+M} (a_n \cdot b_k)_m$$

обозначим

$$S_{N,M} = S_{N^2+M} - S_{N^2} = \sum_{m=N^2+1}^{N^2+M} (a_n \cdot b_k)_m$$

$$|S_{N,M}| \leq |b_{N+1}| \cdot (|a_1| + \dots + |a_{N+1}|) + |a_{N+1}| \cdot (|b_1| + \dots + |b_N|) \rightarrow 0$$

поскольку частичные суммы каждого ряда ограничены и члены, по необходимому признаку, стремятся к нулю. Значит  $S_{N^2+M} \rightarrow AB$ .  $\square$



**Определение.** Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (*)$$

сходится, а ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$$

расходится, то ряд  $(*)$  называется условно сходящимся.

**Утверждение.** Пусть ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

условно сходится. Обозначим

$$a_n^+ \begin{cases} a_n, & a_n > 0, \\ 0, & a_n \leq 0. \end{cases}, \quad a_n^- = \begin{cases} 0, & a_n \geq 0, \\ a_n, & a_n < 0. \end{cases}$$

Тогда ряды

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^+ \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^- \quad (2)$$

расходятся к  $+\infty$  и  $-\infty$  соответственно.

*Доказательство.* Если оба ряда сходятся, то

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^+ - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^-$$

сходится, противоречие. Если ряд (1) сходится, а (2) расходится, то

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^- = \sum_{n=1}^{\infty} a_n - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^+$$

сходится, противоречие. Аналогичное противоречие в случае, когда (2) сходится, а (1) расходится. Значит оба ряда расходятся.  $\square$

**Теорема.** (Теорема Римана)

Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

сходится условно, то  $\forall a \in \mathbb{R} \exists \sigma_a$  такая, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma_a(n)} = a$$

$\exists \sigma_{+\infty}$  и  $\sigma_{-\infty}$  такие, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma_{+\infty}(n)} = +\infty, \quad \sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma_{-\infty}(n)} = -\infty$$

$\exists \sigma$  такая, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)}$$

расходится, но частичные суммы ограничены.

*Доказательство. доказали картинками))))))*

*доказательство появится немного позже*

□

**Теорема.** (Признаки Абеля и Дирихле)

Рассмотрим  $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ ,  $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ .

( $\mathcal{A}$ ): Если

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

сходится, а  $b_n$  монотонна и ограничена, то

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot b_n$$

сходится.

( $\mathcal{D}$ ): Если существует  $M$  такая, что  $\forall N \in \mathbb{N}$ :

$$\left| \sum_{n=1}^N a_n \right| < M$$

и  $b_n$  монотонно сходится к 0, то

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot b_n$$

сходится.

Доказательство. Оценим

$$\left| \sum_{n=k}^m a_n \cdot b_n \right|$$

Введем

$$A_p = \sum_{n=k}^p a_n, \quad A_{k-1} = 0 \Rightarrow a_n = A_n - A_{n-1}$$

отсюда

$$\begin{aligned} \sum_{n=k}^m a_n \cdot b_n &= \sum_{n=k}^m (A_n - A_{n-1}) \cdot b_n = \sum_{n=k}^m A_n \cdot b_n - \sum_{n=k+1}^m A_{n-1} \cdot b_n = \\ &= \sum_{n=k}^m A_n \cdot b_n - \sum_{n=k}^{m-1} A_n \cdot b_{n+1} = \sum_{n=k}^{m-1} A_n \cdot (b_n - b_{n+1}) + A_m \cdot b_m \end{aligned}$$

(A):

$$\left| \sum_{n=k}^{m-1} A_n \cdot (b_n - b_{n+1}) + A_m \cdot b_m \right| \leq \varepsilon \cdot (|b_k - b_m| + |b_m|) < \varepsilon \cdot 3B$$

(D):

$$\left| \sum_{n=k}^{m-1} A_n \cdot (b_n - b_{n+1}) + A_m \cdot b_m \right| \stackrel{(1)}{\leq} 2M \cdot (|b_k - b_m| + |b_m|) < 6M \cdot \varepsilon$$

(1):

$$|A_p| = \left| \sum_{n=k}^p a_n \right| = \left| \sum_{n=1}^p a_n - \sum_{n=1}^{k-1} a_n \right| \leq 2M$$

□

**Следствие.** (Признак Лейбница)

Если  $a_n$  монотонно убывает и  $a_n \rightarrow 0$ , то

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot a_n \quad (*)$$

сходится

Доказательство.

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \right| \leq 1, \quad \forall N \in \mathbb{N}$$

Значит, по признаку Дирихле, ряд (\*) сходится.

□

## 2 Функциональные последовательности и ряды

### 2.1 Функциональные последовательности

**Определение.** Пусть  $\forall n \in \mathbb{N} : f_n(x)$  определены на  $A \subset \mathbb{R}$ . Если  $\forall x \in A$ :

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$$

то говорят, что  $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$  сходится на  $A$  поточечно.

**Примеры.**

1.  $\forall x \in [0, 1]$ :

$$x^n \rightarrow \begin{cases} 1, & x = 1, \\ 0, & x \in [0, 1). \end{cases}$$

2.  $\forall x \in \mathbb{R}$ :

$$\sin \frac{x}{n} \rightarrow 0$$

**Определение.** Пусть  $\forall n : f_n(x)$  определены на  $A \subset \mathbb{R}$ . Если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : \forall n > N_\varepsilon, \forall x \in A : |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$$

то говорят, что  $f_n(x)$  сходится равномерно к  $f(x)$  на  $A$ , и пишут  $f_n(x) \xrightarrow{A} f(x)$ .

**Примеры.**

1. На  $[0, 1]$

$$x^n \not\xrightarrow{A} \begin{cases} 1, & x = 1, \\ 0, & x \in [0, 1]. \end{cases}$$

поскольку  $\exists \varepsilon_0 > 0, \forall N_\varepsilon \exists n > N_\varepsilon, \exists x_{\varepsilon_0} \in [0, 1)$  такой, что  $x_{\varepsilon_0}^n > \varepsilon_0$ .

2. на  $[0, \frac{1}{2}] : x^n \xrightarrow{A} 0$ .

3.  $f_n(x) = x^n - x^{2n}$  на  $[0, 1] : f_n \xrightarrow{A} 0$ .

$$f'_n = n(x^{n-1} - 2x^{2n-1}) = n \cdot x^{n-1}(1 - 2x^n) = 0 \Rightarrow x_n = \frac{1}{\sqrt[n]{2}}, \quad f_n(x_n) = \frac{1}{4}$$

4.  $f_n(x) = \sin \frac{x}{n} \not\xrightarrow{A} 0$  на  $\mathbb{R}$ , но  $\forall a, b, \forall x \in [a, b] : \sin \frac{x}{n} \xrightarrow{A} 0$ .

**Теорема.** (Первый критерий равномерной сходимости последовательности)

$$f_n(x) \xrightarrow{A} f(x) \Leftrightarrow \sup_A |f_n(x) - f(x)| \rightarrow 0$$

*Доказательство.*

$(\Rightarrow)$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : \forall n > N_\varepsilon, \forall x \in A : |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$$

значит, после предельного перехода, получаем:

$$\sup_A |f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon$$

$(\Leftarrow)$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : \forall n > N_\varepsilon : \sup_A |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$$

значит  $x \in A$ :

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \sup_A |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$$

□

**Теорема.** (Второй критерий равномерной сходимости последовательности)

$$f_n(x) \xrightarrow{A} f(x) \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : \forall k, m > N_\varepsilon, \forall x \in A : |f_k(x) - f_m(x)| < \varepsilon$$

*Доказательство.*

$(\Rightarrow)$ :

$$\begin{aligned} |f_k(x) - f_m(x)| &= |f_k(x) - f(x) + f(x) - f_m(x)| \leq \\ &\leq |f_k(x) - f(x)| + |f(x) - f_m(x)| < 2\varepsilon \end{aligned}$$

$(\Leftarrow)$ : Для каждого  $x \in A$  применим критерий Коши для последовательностей. Значит, есть поточечная сходимость  $f_n(x) \rightarrow f(x)$ . Тогда после предельного перехода получим, что  $\forall x \in A$ :

$$|f_k(x) - f(x)| \leq \varepsilon$$

□

**Теорема.** (Признак Вейерштрасса равномерной сходимости последовательности) Пусть  $\forall x \in A : f_n(x) \rightarrow f(x)$ . Если

$$\exists \{c_n\}_{n=1}^\infty, c_n \geq 0, c_n \rightarrow 0 : |f_n(x) - f(x)| \leq c_n \Rightarrow f_n(x) \xrightarrow{A} f(x)$$

*Доказательство.* Перейдем к супремуму:

$$0 \leq \sup_A |f_n(x) - f(x)| \leq c_n < \varepsilon$$

□

**Теорема.** Пусть  $f_n(x) \xrightarrow{A} f(x)$ ,  $f_n(x)$  непрерывна в точке  $x_0 \in A$ . Тогда  $f(x)$  непрерывна в точке  $x_0$ .

*Доказательство.* По определению равномерной сходимости:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : \forall n > N, \forall x \in A : |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$$

Возьмем  $n > N_\varepsilon$  и запишем определение непрерывности:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x \in B_{\delta_\varepsilon}(x_0) \cap A : |f_n(x) - f_n(x_0)| < \varepsilon$$

$$\begin{aligned} |f(x) - f(x_0)| &= |f(x) - f_n(x) + f_n(x) - f_n(x_0) + f_n(x_0) - f(x_0)| \leq \\ &\leq |f(x) - f_n(x)| + |f_n(x) - f_n(x_0)| + |f_n(x_0) - f(x_0)| < 3\varepsilon \end{aligned}$$

□

**Теорема.** (Почленное интегрирование)

Пусть  $f_n(x) \xrightarrow{[a,b]} f(x)$ ,  $f_n \in \mathcal{C}[a, b]$ . Тогда

$$\int_a^x f_n(t) dt \Rightarrow \int_a^x f(t) dt$$

*Доказательство.*

$$\left| \int_a^x f_n(t) dt - \int_a^x f(t) dt \right| \leq \max_{[a,b]} |f_n(t) - f(t)| \cdot |b - a| < \varepsilon \cdot |b - a|$$

□

**Теорема.** (Почленное дифференцирование)

Пусть  $\{f_n(x)\}_{n=1}^\infty$  такая, что  $f_n(x) \in \mathcal{C}^1[a, b]$ ,  $\exists x_0 \in [a, b]$  :

$f_n(x_0) \rightarrow \alpha$ . Пусть  $f'_n(x) \xrightarrow{[a,b]} g(x)$ . Тогда  $f_n(x) \xrightarrow{[a,b]} f(x)$ ,  $f(x) \in \mathcal{C}^1[a, b]$  и  $f'(x) = g(x)$ .

*Доказательство.* По предыдущей теореме и формуле Ньютона-Лейбница:

$$\int_{x_0}^x f'_n(t) dt \Rightarrow \int_{x_0}^x g(t) dt \Rightarrow f_n(x) - f_n(x_0) \Rightarrow \int_{x_0}^x g(t) dt$$

отсюда

$$f_n(x) \Rightarrow \int_{x_0}^x g(t) dt + \alpha = f(x)$$

□

## 2.2 Функциональные ряды

**Определение.** Рассмотрим  $\{a_n(x)\}$ , определенные на  $A \subset \mathbb{R}$ . Пара последовательностей

$$\{\{a_n(x)\}, \{S_n(x) = \sum_{k=1}^n a_k(x)\}\}$$

называется функциональным рядом и обозначается

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \quad (1)$$

1. Если  $\forall x \in A$  ряд (1) сходится к  $S(x)$ , то говорят, что ряд сходится поточечно.

2. Если  $S_n(x) \Rightarrow S(x)$ , то говорят, что ряд (1) сходится равномерно.

3. Если сходится ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n(x)| \quad (2)$$

то говорят, что ряд (1) сходится абсолютно, если ряд (2) расходится, а ряд (1) сходится, то ряд (1) сходится условно.

**Теорема.** (Критерий Коши для функциональных рядов)

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \xRightarrow{A} S(x)$$

тогда и только тогда, когда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : \forall m, k > N_\varepsilon, \forall x \in A : \left| \sum_{n=k+1}^m a_n(x) \right| < \varepsilon$$

*Доказательство.* По критерию Коши для функциональных последовательностей

$$\left| \sum_{n=k+1}^m a_n(x) \right| = |S_m(x) - S_k(x)| < \varepsilon$$

□

**Теорема.** (Необходимое условие равномерной сходимости)

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \xRightarrow{A} S(x)$$

Тогда  $|a_n(x)| \xRightarrow{A} 0$ .

*Доказательство.*

$$|a_n(x)| = |S_n - S_{n-1}| \Rightarrow S(x) - S(x) = 0$$

□

**Теорема.** Пусть  $\forall n : a_n(x)$  определены на  $A$  и непрерывны в точке  $x_0 \in A$  и

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \xrightarrow{A} S(x)$$

Тогда  $S(x)$  непрерывна в точке  $x_0$ .

*Доказательство.*  $S_n(x) \xrightarrow{A} S(x)$  и  $\forall n : a_n(x)$  непрерывна в точке  $x_0$ . Значит,  $S_n(x)$  непрерывна в точке  $x_0$ , и по теореме для функциональных последовательностей,  $S(x)$  непрерывна в точке  $x_0$ . □

**Теорема.** (Почленное интегрирование)

Пусть  $a_n(x) \in \mathcal{C}[a, b]$  и

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \xrightarrow{[a,b]} S(x)$$

Тогда

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_a^x a_n(t) dt \right) \Rightarrow \int_a^x S(t) dt$$

*Доказательство.*  $S_n(x) \xrightarrow{[a,b]} S(x)$ . Проинтегрируем почленно:

$$\int_a^x S_n(t) dt \xrightarrow{[a,b]} \int_a^x S(t) dt$$

что можно  $\forall x \in [a, b]$  записать, как:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_a^x \left( \sum_{n=1}^k a_n(t) \right) dt = \int_a^x \left( \sum_{n=1}^{\infty} a_n(t) \right) dt$$

Таким образом

$$\begin{aligned} \int_a^x \left( \sum_{n=1}^{\infty} a_n(t) \right) dt &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int_a^x \left( \sum_{n=1}^k a_n(t) \right) dt = \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^k \left( \int_a^x a_n(t) dt \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_a^x a_n(t) dt \right) \end{aligned}$$

□



**Теорема.** (Почленное дифференцирование)

Пусть  $a_n(x) \in \mathcal{C}^1[a, b]$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x_0) = \alpha$$

где  $x_0 \in [a, b]$  и

$$\sum_{n=1}^{\infty} a'_n(x) \stackrel{[a,b]}{\Rightarrow} g(x)$$

Тогда

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \stackrel{[a,b]}{\Rightarrow} S(x) \in \mathcal{C}^1[a, b], \quad S'(x) = g(x)$$

*Доказательство.* Очевидно по аналогичной теореме для функциональной последовательности  $S_n(x)$ . □

**Теорема.** (Признак Вейерштрасса равномерной сходимости)

Пусть  $\forall n : |a_n(x)| < \alpha_n, \forall x \in A$ . Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n$$

сходится, то

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \stackrel{A}{\Rightarrow} S(x)$$

*Доказательство.* По критерию Коши:

$$\left| \sum_{n=k+1}^m a_n(x) \right| \leq \sum_{n=k+1}^m |a_n(x)| \leq \sum_{n=k+1}^m \alpha_n < \varepsilon$$

□

**Теорема.** (Признаки Абеля и Дирихле)

Рассмотрим пару последовательностей  $\{a_n(x)\}_{n=1}^{\infty}, \{b_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$  на  $A$ .

( $\mathcal{A}$ :) Пусть

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \stackrel{A}{\Rightarrow}$$

и  $\exists M > 0, \forall x \in A, \forall n : |b_n(x)| < M$  и  $b_n(x)$  монотонна  $\forall x \in A$ .

( $\mathcal{D}$ :) Пусть  $\exists M > 0, \forall x \in A, \forall N \in \mathbb{N} :$

$$\left| \sum_{n=1}^N a_n(x) \right| \leq M$$

и  $b_n(x)$  монотонна  $\forall x \in A$ , причем  $b_n(x) \xrightarrow{A} 0$ . Тогда

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) b_n(x) \xrightarrow{A}$$

*Доказательство.* Аналогично как для числовых рядов. Введем:

$$A_p(x) = \sum_{n=k}^p a_n(x), \quad A_{k-1}(x) = 0 \Rightarrow a_n(x) = A_n(x) - A_{n-1}(x)$$

отсюда

$$\begin{aligned} \sum_{n=k}^m a_n(x) b_n(x) &= \sum_{n=k}^m (A_n(x) - A_{n-1}(x)) b_n(x) = \\ &= \sum_{n=k}^m A_n(x) b_n(x) - \sum_{n=k+1}^m A_{n-1}(x) b_n(x) = \\ &= \sum_{n=k}^m A_n(x) b_n(x) - \sum_{n=k}^{m-1} A_n(x) b_{n+1}(x) = \\ &= \sum_{n=k}^{m-1} A_n(x) (b_n(x) - b_{n+1}(x)) + A_m(x) b_m(x) \end{aligned}$$

(A):

$$\left| \sum_{n=k}^{m-1} A_n(x) (b_n(x) - b_{n+1}(x)) + A_m(x) b_m(x) \right| \leq \varepsilon \cdot 3M$$

(D):

$$\left| \sum_{n=k}^{m-1} A_n(x) (b_n(x) - b_{n+1}(x)) + A_m(x) b_m(x) \right| \leq 2M \cdot 3\varepsilon$$

□

## 2.3 Степенные ряды

**Определение.** Ряды вида

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$$

называются степенными рядами.  $a_n$  - коэффициенты степенного ряда,  $x_0$  - центр разложения.

**Замечание.** В центре разложения ряд сходится.

**Замечание.** Сдвиг  $x - x_0 \mapsto x$  не ограничивает общность ряда, поэтому будем рассматривать ряды вида

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

**Теорема.** (Первая теорема Абеля)

Рассмотрим степенной ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \quad (*)$$

1. Если существует  $x_1 \in \mathbb{R}$ , что  $(*)$  сходится в точке  $x_1$ , то для любых  $x$ , таких, что  $|x| < |x_1|$  ряд  $(*)$  сходится.
2. Если существует  $x_2 \in \mathbb{R}$ , что ряд  $(*)$  расходится в точке  $x_2$ , то для любых  $x$ , таких что  $|x| > |x_2|$  ряд  $(*)$  расходится.

*Доказательство.*

1. Пусть  $x : |x| < |x_1|$ .

$$\sum_{n=0}^{\infty} |a_n x^n| = \sum_{n=0}^{\infty} \left( |a_n x_1^n| \cdot \left| \frac{x}{x_1} \right|^n \right) \stackrel{(1)}{\leq} M \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left| \frac{x}{x_1} \right|^n$$

(1): Поскольку сходится ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n x_1^n$$

то  $a_n x_1^n \rightarrow 0 \Rightarrow |a_n x_1^n| < M$

Таким образом, ряд сходится по признаку сравнения с рядом геометрической прогрессии.

2. Теперь пусть  $x : |x| > |x_2|$ . От противного: пусть есть точка  $y : |y| > |x_2|$ , в которой ряд сходится. Тогда, по первой части теоремы, ряд сходится во всех точках  $x : |x| < |y|$ , а значит и в  $x_2$  - противоречие.

□

**Замечание.** Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \quad (*)$$

Пусть  $A \subset \mathbb{R}$  - все точки, в которых ряд  $(*)$  сходится,  $A \neq \emptyset$ , так как  $\{0\} \in A$ .

Пусть  $B \subset \mathbb{R}$  - все точки, в которых ряд  $(*)$  расходится и пусть  $B \neq \emptyset$ .

Тогда из первой теоремы Абеля следует, что  $A = \{0\}$  или  $\exists a > 0 : (-a, a) \subset A$ , а также  $\exists b > 0 : (-\infty, -b) \cap (b, +\infty) \subset B$ .

**Утверждение.**  $a = b$

*Доказательство.* Предположим что это не так, тогда  $a < b$  или  $b < a$ . Пусть для определенности  $a < b$ , по аксиоме полноты  $\exists c \in \mathbb{R} : a \leq c \leq b$ . Значит  $c$  не лежит ни в  $A$  ни в  $B$ , а такого быть не может, противоречие.  $\square$

**Определение.** Число  $a = b$  называется радиусом сходимости степенного ряда и обозначается  $R$ . Формально полагают, что если  $R = 0$ , то  $A = \{0\}$ , если  $B = \emptyset$ , то  $R := +\infty$ .

**Теорема.** (Формула Коши-Адамара)

Пусть дан ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

Тогда

$$\frac{1}{R} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$$

Если предел равен нулю, то  $R = +\infty$ .

Если предел равен бесконечности, то  $R = 0$ .

*Доказательство.* Применим признак Коши к ряду

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n x^n|} = |x| \cdot \frac{1}{R} = \begin{cases} l < 1 & - \text{сходится, и } |x| < R, \\ l > 1 & - \text{расходится, и } |x| > R \end{cases}$$

$\square$

**Теорема.** Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = S(x) \quad (*)$$

и пусть  $R > 0$ .

1.  $\forall \varepsilon > 0$  на отрезке  $[-R + \varepsilon, R - \varepsilon]$  ряд равномерно сходится.
2.  $S(x) \in \mathcal{C}(-R, R)$ .
3.  $\forall x \in (-R, R)$ :

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n+1} x^{n+1} = \int_0^x S(t) dt$$

4.  $S(x) \in \mathcal{C}^\infty(-R, R)$ .

*Доказательство.*

1.  $|a_n x^n| \leq |a_n| \cdot (R - \varepsilon)^n$  по признаку Вейерштрасса.
2. из пункта 1:  $\forall \varepsilon > 0 : S(x) \in \mathcal{C}[-R + \varepsilon, R - \varepsilon] \Rightarrow S(x) \in \mathcal{C}(-R, R)$ .
3. Поскольку ряд  $(*)$  равномерно сходится на любом отрезке внутри  $(-R, R)$ , то можно почленно интегрировать

$$\int_0^x S(t) dt = \int_0^x \left( \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n \right) dt = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \int_0^x a_n t^n dt \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n+1} x^{n+1}$$

4. Заметим, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n^\alpha} = 1$$

значит  $\forall \alpha \in \mathbb{R}$  ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n n^\alpha x^n$$

имеет, по формуле Коши-Адамара, тот же радиус сходимости  $R$ . Тогда по теореме о почленном дифференцировании функциональных рядов, получим утверждение пункта.

□

**Теорема.** (Вторая теорема Абеля)

Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = S(x), \quad R > 0$$

Пусть

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n R^n$$

сходится. Тогда  $S(x) \in \mathcal{C}[0, R]$  то есть

$$\exists \lim_{x \rightarrow R-0} \left( \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \right) = S(R)$$

*Доказательство.*

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n R^n \cdot \left( \frac{x}{R} \right)^n$$

а этот ряд, по признаку Абеля, равномерно сходится на  $[0, R]$ .

□

## 2.4 Ряды Тейлора

**Определение.** Пусть  $f(x) \in C^\infty(B(x_0))$ . Ряд вида

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n$$

называется рядом Тейлора функции  $f(x)$  с центром ряда  $x_0$ .

**Замечание.** Далее везде центр разложения в 0.

**Теорема.** Если в некоторой окрестности нуля выполнено равенство

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = f(x)$$

то

$$a_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}$$

*Доказательство.* Подставим  $x = 0$ , тогда  $a_0 = f(0)$ . Продифференцируем и подставим  $x = 0$ , тогда  $a_1 = f'(0)$ . Снова продифференцируем и подставим  $x = 0$ , тогда  $a_2 = \frac{f''(0)}{2}$ . Продолжая выполнять эту операцию, для каждого  $n$  получим  $a_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}$ .  $\square$

**Теорема.** Пусть  $f(x) \in C^\infty(-a, a)$  и  $|f^{(n)}(x)| \leq A^n$ ,  $A > 0$ .

Тогда

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} \cdot x^n = f(x) \text{ на } (-a, a)$$

*Доказательство.* По формуле Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа  $\forall x \in (-a, a)$ :

$$f(x) = \sum_{n=0}^N \frac{f^{(n)}(0)}{n!} x^n + \frac{f^{(N+1)}(\xi)}{(N+1)!} x^{N+1}$$

Тогда

$$\left| f(x) - \sum_{n=0}^N \frac{f^{(n)}(0)}{n!} x^n \right| = \left| \frac{f^{(N+1)}(\xi)}{(N+1)!} x^{N+1} \right| \leq \frac{A^{N+1} \cdot a^{N+1}}{(N+1)!} \rightarrow 0$$

$\square$

**Пример.** Рассмотрим функцию

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

Несложно проверить, что  $f(x) \in C^\infty(B(0))$ ,  $f^{(n)}(0) = 0$ .

Значит,

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} x^n \equiv 0 \neq f(x)$$

**Пример.** (Контрпример к обратному утверждению второй теоремы Абеля)

Рассмотрим ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n$$

Этот ряд сходится на  $(-1, 1)$ , причём

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n = \frac{1}{1+x} \xrightarrow{x \rightarrow 1-0} \frac{1}{2}$$

но ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n$$

не сходится.

**Лемма.** Если  $a_n \rightarrow A$  при  $n \rightarrow \infty$ , то

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n \rightarrow A$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n - A \right| &= \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N a_n - AN \right| \leq \\ &\leq \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^{N_1} a_n - AN_1 \right| + \frac{1}{N} \sum_{n=N_1+1}^N |a_n - A| < \varepsilon \cdot \frac{N - N_1}{N} + \varepsilon < 2\varepsilon \end{aligned}$$

□

**Теорема.** (Теорема Таубера)

Пусть степенной ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

сходится на  $(-1, 1)$ , существует

$$\lim_{x \rightarrow 1-0} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = A$$

и пусть  $a_n = \bar{\bar{o}}(\frac{1}{n})$ ,  $n \rightarrow \infty$ .

Тогда существует

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n = A$$

*Доказательство.* Обозначим  $\forall x \in (0, 1)$

$$N_x = \left[ \frac{1}{1-x} \right]$$

и введём функцию

$$\varphi(x) = \sum_{n=0}^{N_x} a_n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

Если  $\varphi(x) \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow 1 - 0$ , то теорема доказана.

$$\varphi(x) = \sum_{n=0}^{N_x} a_n (1 - x^n) + \sum_{n=N_x+1}^{\infty} a_n x^n$$

$$\begin{aligned} \left| \sum_{n=0}^{N_x} a_n (1 - x^n) \right| &= \left| \sum_{n=0}^{N_x} a_n (1 - x)(1 + x + \dots + x^{n-1}) \right| \leq \\ &\leq \frac{1}{1-x} \sum_{n=0}^{N_x} |a_n| n \leq \frac{1}{N_x} \sum_{n=0}^{N_x} |a_n n| \rightarrow 0, \quad x \rightarrow 1 - 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left| \sum_{n=N_x+1}^{\infty} a_n x^n \right| &= \left| \sum_{n=N_x+1}^{\infty} \frac{a_n n}{n} x^n \right| < \frac{1}{N_x + 1} \sum_{n=N_x+1}^{\infty} \varepsilon x^n < \\ &< \frac{\varepsilon}{N_x + 1} \sum_{n=0}^{\infty} x^n = \frac{\varepsilon}{N_x + 1} \cdot \frac{1}{1-x} < \varepsilon \end{aligned}$$

Отсюда  $|\varphi(x)| < 2\varepsilon \quad \forall n > N_x$ . □

### 3 Бесконечные произведения

**Определение.** Рассмотрим  $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}, \{P_n = \prod_{k=1}^n u_k\}_{n=1}^{\infty}$ .

Пара последовательностей  $\{\{u_n\}_{n=1}^{\infty}, \{P_n\}_{n=1}^{\infty}\}$  называется бесконечным произведением чисел  $\{u_n\}$ , обозначается

$$\prod_{n=1}^{\infty} u_n$$

$u_n$  - общий член,  $P_n$  - частичное произведение.



**Определение.**  $\prod_{n=1}^{\infty} u_n$  называется сходящимся, если  $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \Pi_n = a \neq 0$ .

$\prod_{n=1}^{\infty} u_n$  называется расходящимся, если  $\nexists \lim_{n \rightarrow \infty} \Pi_n$  или  $\lim_{n \rightarrow \infty} \Pi_n = 0$ . Если  $\exists n : u_n = 0$ , то  $\prod_{n=1}^{\infty} u_n$  называется расходящимся к 0.

**Теорема.** (Необходимое условие сходимости) Если  $\prod_{n=1}^{\infty} u_n$  сходится, то  $u_n \rightarrow 1$ .

*Доказательство.*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Pi_n}{\Pi_{n-1}} = 1$$

□

**Следствие.** Если произведение сходится, то общий член имеет вид

$$u_n = 1 + a_n, \quad a_n \rightarrow 0$$

**Теорема.** Произведение

$$\prod_{n=1}^{\infty} (1 + a_n)$$

сходится тогда и только тогда, когда ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \ln(1 + a_n)$$

сходится.

*Доказательство.*

$(\Rightarrow)$ :

$$\Pi_N - \text{сходится} \Rightarrow \ln(\Pi_N) - \text{сходится}, \ln(x) \in \mathcal{C}(0, +\infty) \Rightarrow \sum_{n=1}^N \ln(1+a_n) - \text{сходится}$$

$(\Leftarrow)$ :

$$\sum_{n=1}^N \ln(1 + a_n) - \text{сходится} \Rightarrow e^{\left(\sum_{n=1}^N \ln(1+a_n)\right)} - \text{сходится} \Rightarrow \Pi_N - \text{сходится}$$

□

**Определение.** Произведение называется абсолютно сходящимся или условно сходящимся, если таковым является соответствующий ряд из логарифмов.

**Теорема.** Произведение

$$\prod_{n=1}^{\infty} u_n$$

сходится абсолютно тогда и только тогда, когда ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$$

сходится.

*Доказательство.*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|\ln(1 + a_n)|}{|a_n|} = 1$$

из этого следует утверждение в обе стороны. □

**Следствие.** Если  $a_n$  знакопостоянны, то произведение и соответствующий ряд из логарифмов сходятся или расходятся одновременно.

**Теорема.** Пусть ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

сходится. Тогда произведение

$$\prod_{n=1}^{\infty} (1 + a_n)$$

сходится или расходится одновременно с рядом

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2$$

*Доказательство.*

$$\ln(1 + a_n) - a_n = -\frac{a_n^2}{2} + \bar{o}(a_n^2)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(1 + a_n) - a_n}{a_n^2} = -\frac{1}{2}$$

□

**Замечание.** Можно рассматривать функциональные произведения

$$\prod_{n=1}^{\infty} (1 + a_n(x))$$

анализируя соответствующий функциональный ряд из логарифмов.

**Пример.** (Пример Эйлера)

Пусть  $p_k$  обозначает  $k$ -е простое число. Тогда при  $s > 1$

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_{k=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{p_k^s}\right)^{-1}$$

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^N \left(1 - \frac{1}{p_k^s}\right)^{-1} &= \prod_{k=1}^N \left(\sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{p_k^{ls}}\right) = \sum \frac{1}{(p_{k_1}^{l_1} \cdot p_{k_2}^{l_2} \cdot \dots \cdot p_{k_m}^{l_m})^s} \\ \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^s} &< \sum \frac{1}{(p_{k_1}^{l_1} \cdot p_{k_2}^{l_2} \cdot \dots \cdot p_{k_m}^{l_m})^s} < \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} \end{aligned}$$

Тогда

$$\sum \frac{1}{(p_{k_1}^{l_1} \cdot p_{k_2}^{l_2} \cdot \dots \cdot p_{k_m}^{l_m})^s} \rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \zeta(s), \quad N \rightarrow \infty$$

### 3.1 Разложение синуса в бесконечное произведение

**Теорема.**  $\forall x \neq \pi k$ :

$$\sin x = x \cdot \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x^2}{\pi^2 n^2}\right)$$

*Доказательство.*  $\forall n : \sin((2n+1)x) = (2n+1) \sin x \cdot P_n(\sin^2 x)$

это утверждение можно показать по индукции, с базой  $\sin 3x = 3 \sin x - 4 \sin^3 x$

$$\sin((2n+1)x) = 0 \Leftrightarrow x = \frac{\pi k}{2n+1}, \quad k \in \mathbb{Z}$$

при этом

$$P_n(\sin^2 x) = 0, \quad x = \frac{\pi k}{2n+1}, \quad k = 1, \dots, n$$

$$P_n(\omega) = 0 \Leftrightarrow \omega = \sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}, \quad k = 1, \dots, n$$

Заметим, что

$$P_n(\sin^2 x) = \frac{\sin((2n+1)x)}{(2n+1) \sin x} \rightarrow 1, \quad x \rightarrow 0$$

Тогда

$$\begin{aligned} P_n(\omega) &= \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{\omega}{\sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}}\right) \\ P_n(\sin^2 x) &= \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{\sin^2 x}{\sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}}\right) = \frac{\sin((2n+1)x)}{(2n+1) \sin x} \end{aligned}$$

сделаем замену:  $(2n+1)x = t$

$$\frac{\sin t}{(2n+1) \cdot \sin \frac{t}{2n+1}} = \prod_{k=1}^n \left( 1 - \frac{\sin^2 \frac{t}{2n+1}}{\sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}} \right)$$

**Лемма.**  $\forall \{a_k\}_{k=1}^n \subset \mathbb{R}$  :

$$\left| \prod_{k=1}^n (1 + a_k) - 1 \right| \leq \prod_{k=1}^n (1 + |a_k|) - 1$$

*Доказательство.* Очев по индукции. □

Возьмем  $\forall t \in \mathbb{R}, |t| < n, m < n$

$$\frac{\sin t}{(2n+1) \cdot \sin \frac{t}{2n+1}} = \prod_{k=1}^m \left( 1 - \frac{\sin^2 \frac{t}{2n+1}}{\sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}} \right) \cdot R_{n,m}(t) \Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} R_{n,m}(t) = R_m(t)$$

Перейдем к пределу при  $n \rightarrow \infty$ :

$$\frac{\sin t}{t} = \prod_{k=1}^m \left( 1 - \frac{t^2}{\pi^2 k^2} \right) \cdot R_m(t)$$

Вернемся к  $R_{m,n}$ :

$$\begin{aligned} \left| \prod_{k=m+1}^n \left( 1 - \frac{\sin^2 \frac{t}{2n+1}}{\sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}} \right) \right| &\leq \prod_{k=m+1}^n \left( 1 + \frac{\sin^2 \frac{t}{2n+1}}{\sin^2 \frac{\pi k}{2n+1}} \right) - 1 \leq \\ &\leq \prod_{k=m+1}^n \left( 1 + \frac{t^2}{\left(\frac{2}{\pi} \cdot \pi k\right)^2} \right) - 1 = \prod_{k=m+1}^n \left( 1 + \frac{t^2}{4k^2} \right) - 1 < \\ &< \prod_{k=m+1}^{\infty} \left( 1 + \frac{t^2}{4k^2} \right) - 1 \rightarrow 0 \end{aligned}$$

при  $m \rightarrow \infty \Rightarrow R_m(t) \rightarrow 1, m \rightarrow \infty$ . Значит

$$\sin t = t \cdot \prod_{k=1}^{\infty} \left( 1 - \frac{t^2}{\pi^2 k^2} \right)$$

□

**Следствие.** (Формула Валлиса)

При  $t = \frac{\pi}{2}$

$$1 = \frac{\pi}{2} \cdot \prod_{k=1}^{\infty} \left( 1 - \frac{1}{4k^2} \right) \Rightarrow \frac{2}{\pi} = \prod_{k=1}^{\infty} \left( \frac{4k^2 - 1}{4k^2} \right)$$

## 4 Интегралы с параметром

### 4.1 Собственные интегралы с параметром

Пусть  $\varphi(y), \psi(y) \in \mathcal{C}[a, b]$ ,  $\varphi(y) \leq \psi(y)$ . Рассмотрим  $G \subset \mathbb{R}^2$  :

$$G = \{(x, y) : y \in [a, b], \varphi(y) \leq x \leq \psi(y)\}$$

см. рисунок ниже

**Определение.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{R}[\varphi(y), \psi(y)]$ . Интеграл

$$F(y) = \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y) dx$$

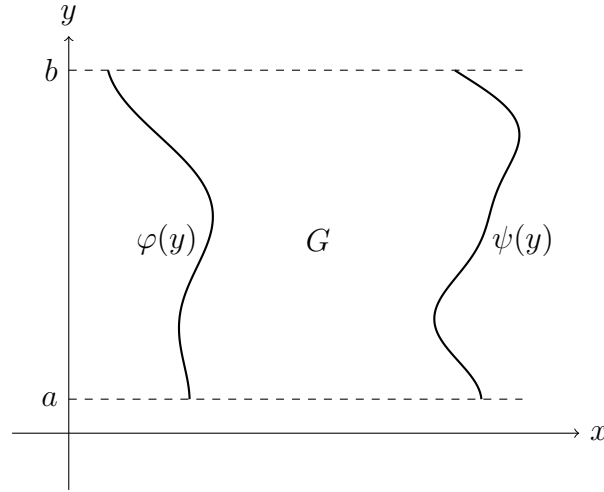
называется собственным интегралом с параметром.

**Теорема.** Пусть  $\varphi(x), \psi(x) \in \mathcal{C}[a, b]$ ,  $f(x, y) \in \mathcal{C}(G)$ . Тогда

$$F(y) = \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y) dx \in \mathcal{C}[a, b]$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} |F(y + \Delta y) - F(y)| &= \left| \int_{\varphi(y+\Delta y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx - \right. \\ &\quad \left. - \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx + \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx - \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y) dx \right| \stackrel{(1)}{\leq} \\ &\stackrel{(1)}{\leq} \left| \int_{\varphi(y+\Delta y)}^{\varphi(y)} f(x, y + \Delta y) dx \right| + \left| \int_{\psi(y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx \right| + \\ &\quad + \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} |f(x, y + \Delta y) - f(x, y)| dx \stackrel{(2)}{\leq} M \cdot \varepsilon + M \cdot \varepsilon + \varepsilon \cdot \max_y |\psi(y) - \varphi(y)| \end{aligned}$$



(1):

$$\begin{aligned}
 \int_{\varphi(y+\Delta y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx - \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx &= \int_{\varphi(y+\Delta y)}^{\varphi(y)} f(x, y + \Delta y) dx + \\
 \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx + \int_{\psi(y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx - \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx &= \\
 = \int_{\varphi(y+\Delta y)}^{\varphi(y)} f(x, y + \Delta y) dx + \int_{\psi(y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx
 \end{aligned}$$

(2): Первые два слагаемых оцениваются так:  $f(x, y + \Delta y) \leq M$ , так как  $f \in \mathcal{C}(G)$  и, поскольку  $\varphi(y)$  и  $\psi(y)$  непрерывны, то  $|\varphi(y + \Delta y) - \varphi(y)| < \varepsilon$  и  $|\psi(y + \Delta y) - \psi(y)| < \varepsilon$ .

Последнее слагаемое оценивается так:  $f \in \mathcal{C}(G)$ , значит,  $f$  равномерно непрерывна (так как  $G$  - компакт)  $\Rightarrow$  при  $\Delta y \rightarrow 0 : |f(x, y + \Delta y) - f(x, y)| < \varepsilon$   $\square$

**Теорема.** Пусть  $\varphi(y), \psi(y) \in \mathcal{C}^1[a, b]$ ,  $f(x, y) \in \mathcal{C}(G)$ ,  $\exists f'_y(x, y) \in \mathcal{C}(G)$ . Тогда  $F(y) \in \mathcal{C}^1(G)$  и

$$F'(y) = \left( \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y) dx \right)' = \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f'_y(x, y) dx + f(\psi(y), y) \cdot \psi'(y) - f(\varphi(y), y) \cdot \varphi'(y)$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\Delta y}(F(y + \Delta y) - F(y)) &= \\
&= \frac{1}{\Delta y} \left( \int_{\varphi(y+\Delta y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx - \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx + \right. \\
&+ \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y + \Delta y) dx - \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x, y) dx \left. \right) \stackrel{(1)}{=} \frac{1}{\Delta y} \int_{\psi(y)}^{\psi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx - \\
&- \frac{1}{\Delta y} \int_{\varphi(y)}^{\varphi(y+\Delta y)} f(x, y + \Delta y) dx + \frac{1}{\Delta y} \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} (f(x, y + \Delta y) - f(x, y)) dx \stackrel{(2)}{=} \\
&\stackrel{(2)}{=} \frac{1}{\Delta y} (\psi(y + \Delta y) - \psi(y)) \cdot f(\psi(y + \theta_1 \Delta y), y + \Delta y) - \\
&- \frac{1}{\Delta y} (\varphi(y + \Delta y) - \varphi(y)) f(\varphi(y + \theta_2 \Delta y), y + \Delta y) + \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f'_y(x, y + \theta_3 \Delta y) dx
\end{aligned}$$

(1): Аналогично предыдущей теореме

(2): Применяем теорему о среднем к первому и второму слагаемому, и теорему Лагранжа к третьему слагаемому ( $0 < \theta_1, \theta_2, \theta_3 < 1$ )

Значит существует предел при  $\Delta y \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{F(y + \Delta y) - F(y)}{\Delta y} = \psi'(y) f(\psi(y), y) - \varphi'(y) f(\varphi(y), y) + \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f'_y(x, y) dx$$

□

**Теорема.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{C}([a, b] \times [c, d])$ . Тогда

$$\int_c^d \left( \int_a^b f(x, y) dx \right) dy = \int_a^b \left( \int_c^d f(x, y) dy \right) dx$$

*Доказательство.* Рассмотрим

$$\begin{aligned}
F(t) &= \int_c^t \left( \int_a^b f(x, y) dx \right) dy, \quad G(t) = \int_a^b \left( \int_c^t f(x, y) dy \right) dx \\
F'(t) &= \int_a^b f(x, t) dx, \quad G'(t) = \int_a^b f(x, t) dx
\end{aligned}$$

Отсюда  $F(t) - G(t) = \tilde{C}$ . Заметим, что  $F(C) = G(C) = 0 \Rightarrow \tilde{C} = 0$ . Значит  $F(t) = G(t)$ , в частности для  $t = d$ .  $\square$

## 4.2 Несобственные интегралы с параметром

**Определение.** Рассмотрим несобственный интеграл

$$\int_a^\omega f(x, y) dx$$

Пусть на  $Y \subset \mathbb{R}$ :

$$\int_a^\omega f(x, y) dx = F(y)$$

Если  $\forall \varepsilon > 0 \exists A \in [a, \omega) : \forall a' > A, \forall y \in Y :$

$$\left| \int_a^{a'} f(x, y) dx - F(y) \right| < \varepsilon$$

то

$$\int_a^\omega f(x, y) dx \xrightarrow{Y} F(y)$$

Далее, без ограничения общности будем писать  $\omega = +\infty$ .

**Теорема.** (Критерий Коши)

$$\int_a^{a'} f(x, y) dx \xrightarrow{Y} F(y) = \int_a^{+\infty} f(x, y) dx$$

тогда и только тогда, когда  $\forall \varepsilon > 0 \exists A > a, \forall a_1, a_2 > A, \forall y \in Y :$

$$\left| \int_{a_1}^{a_2} f(x, y) dx \right| < \varepsilon$$

*Доказательство.*

$(\Rightarrow)$ :

$$\left| \int_{a_1}^{a_2} f(x, y) dx \right| = \left| \int_{a_1}^{+\infty} f(x, y) dx - \int_{a_2}^{+\infty} f(x, y) dx \right| < 2\varepsilon$$



( $\Leftarrow$ ):

$$\left| \int_{a_1}^{a_2} f(x, y) \, dx \right| < \varepsilon$$

Тогда при  $a_2 \rightarrow +\infty$ :

$$\left| \int_{a_1}^{+\infty} f(x, y) \, dx \right| \leq \varepsilon$$

□

**Теорема.** (Признак Вейерштрасса равномерной сходимости)

Рассмотрим

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) \, dx, \quad y \in Y$$

Если  $\exists g(x)$  такая, что  $|f(x, y)| < g(x)$  и сходится интеграл

$$\int_a^{+\infty} g(x) \, dx$$

то интеграл

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) \, dx$$

сходится равномерно на  $Y$ .

*Доказательство.* По критерию Коши:

$$\left| \int_{a_1}^{a_2} f(x, y) \, dx \right| \leq \int_{a_1}^{a_2} g(x) \, dx < \varepsilon$$

□

**Теорема.** (Признаки Абеля и Дирихле равномерной сходимости)

Рассмотрим интеграл

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) \cdot g(x, y) \, dx, \quad y \in Y$$

Пусть  $|f(x, y)|, |g(x, y)| < M$

(A):

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) dx \xrightarrow{Y}$$

$g(x, y)$  монотонна  $\forall y$ . Тогда интеграл

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) \cdot g(x, y) dx \xrightarrow{Y}$$

(D):

$$\left| \int_a^A f(x, y) dx \right| < M$$

$g(x, y)$  монотонна и  $g(x) \xrightarrow{Y} 0$ . Тогда

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) \cdot g(x, y) dx \xrightarrow{Y}$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \left| \int_{a_1}^{a_2} f(x, y) g(x, y) dx \right| &= \left| g(a_1, y) \cdot \int_{a_1}^c f(x, y) dx + g(a_2, y) \cdot \int_c^{a_2} f(x, y) dx \right| \leq \\ &\leq |g(a_1, y)| \cdot \left| \int_{a_1}^c f(x, y) dx \right| + |g(a_2, y)| \cdot \left| \int_c^{a_2} f(x, y) dx \right| = (*) \end{aligned}$$

$$(A) : (*) \leq \varepsilon \cdot M + \varepsilon \cdot M$$

$$(D) : (*) \leq \varepsilon \cdot 2M + \varepsilon \cdot 2M$$

□

**Теорема.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{C}([a, +\infty) \times [c, d])$  и

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) dx \xrightarrow{[c, d]} F(y)$$

Тогда  $F(y) \in \mathcal{C}[c, d]$ .

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \left| \int_a^{+\infty} f(x, y + \Delta y) dx - \int_a^{+\infty} f(x, y) dx \right| &\leq \left| \int_a^{+\infty} f(x, y + \Delta y) dx - \int_a^A f(x, y + \Delta y) dx \right| + \\ &+ \left| \int_a^A f(x, y + \Delta y) dx - \int_a^A f(x, y) dx \right| + \left| \int_a^A f(x, y) dx - \int_a^{+\infty} f(x, y) dx \right| < 3\varepsilon \end{aligned}$$

□

**Теорема.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{C}([a, +\infty] \times [c, d])$ ,  $\exists f'_y(x, y) \in \mathcal{C}([a, +\infty] \times [c, d])$

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) dx = F(y), \quad \int_a^{+\infty} f'_y(x, y) dx \stackrel{[c, d]}{\Rightarrow} G(y)$$

Тогда  $\exists F'(y) = G(y)$ .

*Доказательство.* Рассмотрим  $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ ,  $x_n \rightarrow +\infty$  и

$$F_n(y) = \int_a^{x_n} f(x, y) dx$$

По теореме о дифференцировании функциональных последовательностей и теореме о дифференцировании собственных интегралов:

$$F'_n(y) \Rightarrow G(y) \Rightarrow F'(y) = G(y)$$

□

**Теорема.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{C}([a, +\infty] \times [c, d])$  и

$$\int_a^{+\infty} f(x, y) dx \Rightarrow F(y)$$

Тогда

$$\int_c^d \left( \int_a^{+\infty} f(x, y) dx \right) dy = \int_a^{+\infty} \left( \int_c^d f(x, y) dy \right) dx$$

*Доказательство.* Рассмотрим произвольную  $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ ,  $x_n \rightarrow +\infty$

$$F_n(y) = \int_a^{x_n} f(x, y) dx$$

Тогда по теореме для собственных интегралов:

$$\int_c^d \left( \int_a^{x_n} f(x, y) dx \right) dy = \int_a^{x_n} \left( \int_c^d f(x, y) dy \right) dx$$

$$\begin{aligned} \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \int_c^d F_n(y) dy \right) &= \int_c^d \left( \int_a^{+\infty} f(x, y) dx \right) dy = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^{x_n} \left( \int_c^d f(x, y) dy \right) dx = \int_a^{+\infty} \left( \int_c^d f(x, y) dy \right) dx \end{aligned}$$

□

**Теорема.** (Признак Дини равномерной сходимости последовательности)

Пусть  $\forall n : f_n(x) \in \mathcal{C}[a, b]$ ,  $\forall x \in [a, b] : f_n(x)$  монотонны по  $n$  и

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$$

Тогда  $f_n(x) \xrightarrow{[a, b]} f(x)$ .

*Доказательство.*

$$\forall x_0 \in [a, b], \forall \varepsilon > 0 \exists N_{\varepsilon, x_0}, \forall n \geq N_{\varepsilon, x_0} : |f_n(x_0) - f(x_0)| < \varepsilon$$

Отсюда  $\exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x \in B_{\delta_\varepsilon}(x_0) :$

$$|f_{N_{\varepsilon, x_0}}(x) - f(x)| \leq |f_{N_{\varepsilon, x_0}}(x) - f_{N_{\varepsilon, x_0}}(x_0)| + |f_{N_{\varepsilon, x_0}}(x_0) - f(x_0)| + |f(x_0) - f(x)| < 3\varepsilon$$

Из монотонности следует, что для всех номеров, больших данного, неравенство выполняется.

Рассмотрим покрытие:

$$[a, b] \subset \bigcup_{x \in [a, b]} B_{\delta_\varepsilon}(x) \Rightarrow \exists \{x_i\}_{i=1}^k, [a, b] \subset \bigcup_{i=1}^k B_{\delta_\varepsilon}(x_i)$$

Возьмем  $N_\varepsilon = \max_{i=1, \dots, k} (N_{\varepsilon, x_i})$ . Тогда

$$\forall x \in [a, b], \forall n > N_\varepsilon : |f_n(x) - f(x)| < 3\varepsilon$$

□

**Теорема.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{C}([a, +\infty) \times [b, +\infty))$ ,  $f(x, y) \geq 0$ . Пусть существует

$$F(y) = \int_a^{+\infty} f(x, y) dx \in \mathcal{C}[b, +\infty)$$

и пусть существует

$$G(x) = \int_b^{+\infty} f(x, y) dy \in \mathcal{C}[a, +\infty)$$

Если существует

$$\int_b^{+\infty} F(y) dy = I$$

то существует

$$\int_a^{+\infty} G(x) dx = I$$

*Доказательство.* Введем монотонные последовательности  $a_n \rightarrow +\infty$ ,  $b_k \rightarrow +\infty$

$$F_n(y) = \int_a^{a_n} f(x, y) \, dx, \quad G_k(x) = \int_b^{b_k} f(x, y) \, dy$$

Заметим, что по признаку Дини

$$F_n(y) \Rightarrow F(y), \quad G_k(x) \Rightarrow G(x)$$

по теореме для собственных интегралов

$$\int_b^{b_k} \left( \int_a^{a_n} f(x, y) \, dx \right) dy = \int_a^{a_n} \left( \int_b^{b_k} f(x, y) \, dy \right) dx$$

Пусть

$$C_{nk} = \int_b^{b_k} F_n(y) \, dy = \int_a^{a_n} G_k(x) \, dx$$

Тогда

$$C_{nk} = \int_b^{b_k} F_n(y) \, dy \leq \int_b^{b_k} F(y) \, dy \leq \int_b^{+\infty} F(y) \, dy = I$$

но с другой стороны

$$C_{nk} = \int_a^{a_n} G_k(x) \, dx \leq \int_a^{a_n} G(x) \, dx \rightarrow \int_a^{+\infty} G(x) \, dx = I' \leq I$$

Теперь мы знаем что существует интеграл

$$\int_a^{+\infty} G(x) \, dx = I'$$

и можем повторить это рассуждение в другом порядке (сначала для  $G$ , а потом для  $F$ ) и получить, что  $I \leq I' \Rightarrow I = I'$ .  $\square$

**Следствие.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{C}([a, +\infty) \times [b, +\infty))$ . Пусть существуют

$$F(y) = \int_a^{+\infty} f(x, y) \, dx \in \mathcal{C}[b, +\infty), \quad \int_a^{+\infty} |f(x, y)| \, dx$$

и пусть существуют

$$G(x) = \int_b^{+\infty} f(x, y) dy \in \mathcal{C}[a, +\infty), \quad \int_b^{+\infty} |f(x, y)| dy$$

Если существуют

$$\int_b^{+\infty} F(y) dy = I, \quad \int_b^{+\infty} |F(y)| dy$$

то существуют

$$\int_a^{+\infty} G(x) dx = I, \quad \int_a^{+\infty} |F(y)| dy$$

*Доказательство.* Заметим, что  $|f(x, y)| - f(x, y) \geq 0$ ,  $|f(x, y)| \geq 0 \Rightarrow$  верны условия теоремы.  $\square$

**Теорема.**  $\forall a \in \mathbb{R}$  :

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sin ax}{x} dx = \frac{\pi}{2} \operatorname{sgn}(a)$$

*Доказательство.* Пусть

$$I(a) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin ax}{x} dx,$$

Заметим, что  $I(0) = 0$ ,  $I(-a) = I(a)$ . Далее рассматриваем только  $a > 0$ . Введем

$$I(a, \varepsilon) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin ax}{x} \cdot e^{-\varepsilon x} dx, \quad \varepsilon \geq 0$$

Пусть  $a \geq a_0 > 0$ ,  $\varepsilon \geq 0$ . По теоремам выше  $I(a, \varepsilon)$  непрерывна.

$$I'_a(a, \varepsilon) = \int_0^{+\infty} \cos ax \cdot e^{-\varepsilon x} dx$$

при  $a \geq a_0 > 0$ ,  $\varepsilon \geq \varepsilon_0 > 0$ . Интегрируем по частям:

$$I'_a(a, \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{a} \int_0^{+\infty} \sin ax \cdot e^{-\varepsilon x} dx = \frac{\varepsilon}{a^2} - \frac{\varepsilon^2}{a^2} \cdot \int_0^{+\infty} \cos ax \cdot e^{-\varepsilon x}$$

$$I'_a(a, \varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{a^2}\right) = \frac{\varepsilon}{a^2} \Rightarrow I'_a(a, \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 + a^2} \Rightarrow I_a(a, \varepsilon) = \arctan \frac{a}{\varepsilon} + C(\varepsilon)$$

При  $a = 0 : I(a, \varepsilon) = 0 \Rightarrow C(\varepsilon) = 0$ . Значит

$$I_a(a, \varepsilon) = \arctan \frac{a}{\varepsilon}$$

При  $\varepsilon \rightarrow 0+$  из непрерывности

$$I(a) = \frac{\pi}{2}$$

□