

# Расчетно-графическая работа по математическому анализу

## Вариант 6

Егор Федоров    Даниил Горляков

Университет ИТМО

Декабрь 2023

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Задание 1. Потенциал векторного поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Дано векторное поле  $\mathbf{H} = (e^x; -e^y)$ .

План:

1. Убедитесь, что поле потенциально
2. Найдите уравнения векторных линий
3. Изобразите векторные линии на рисунке
4. Найдите потенциал поля при помощи криволинейного интеграла
5. Изобразите линии уровня потенциала (эквипотенциальные линии).  
Проиллюстрируйте ортогональность линий уровня и векторных линий.
6. Зафиксируйте точки  $A$  и  $B$  на какой-либо векторной линии. Вычислите работу поля вдоль этой линии.

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

## Необходимое условие потенциальности поля

Пусть  $\mathbf{H}$  – векторное поле. Тогда, если в некотором шаре выполняется условие  $\frac{\partial H_x}{\partial y} = \frac{\partial H_y}{\partial x}$ , то поле  $\mathbf{H}$  потенциально в этом шаре [2, ст. 270, 272].

$$\frac{\partial H_x}{\partial y} = \frac{\partial(e^x)}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \frac{\partial(-e^y)}{\partial x} = 0$$

Очевидно, что необходимое условие выполняется на  $\mathbb{R}^2$ , а значит поле  $\mathbf{H}$  потенциально на  $\mathbb{R}^2$ .

## Уравнения векторных линий

Для нахождения уравнений векторных линий решим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{e^x} = \frac{dy}{-e^y}$$

Проинтегрируем полученное уравнение:

$$\int e^{-x} dx = \int -e^{-y} dy$$

Интегрируя, получаем:

$$\begin{aligned} -e^{-x} + C_1 &= e^{-y} + C_2 \\ e^{-y} + e^{-x} &= C \end{aligned}$$

Перенесем  $e^{-x}$  в правую часть и прологарифмируем:

$$y = -\ln(C - e^{-x}), \quad C - e^{-x} > 0 \iff x > -\ln(C), \quad C > 0 \quad (1)$$

# Векторные линии

На рис. 1 черным цветом нарисованы векторные линии (1) для  $C \in \{e^1, e^2, \dots, e^9\}$ , синим - векторное поле в данных точках.



Рис. 1: Векторные линии поля  $H$

# Потенциал векторного поля

Пусть  $U(R)$  – потенциал поля  $\mathbf{H}$ .

$$U(R) = \int_{\widehat{AR}} \mathbf{H} d\mathbf{r}$$

Где  $A$  – точка поля, координаты которой удовлетворяют условиям существования полей  $\mathbf{H}$  и  $\text{rot } \mathbf{H}$ .

Возьмем в качестве  $A$  точку  $(0; 0)$ . Так как интеграл в уравнении (6) не зависит от пути, то разобьем его на две линии  $(0; 0) - (R_x; 0) - (R_x; R_y)$

$$\begin{aligned} U(R) &= \int_{(0;0)}^{(R_x;0)} (e^x dx + (-e^y dy)) + \int_{(R_x;0)}^{(R_x;R_y)} (e^x dx + (-e^y dy)) = \\ &= \int_0^{R_x} e^x dx - \int_0^{R_y} e^y dy = e^{R_x} - e^{R_y} \end{aligned}$$

# Потенциал векторного поля: проверка

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

По определению потенциала векторного поля [2, ст. 269],  $\text{grad } U = \mathbf{H}$ .  
Проверим это.

$$\text{grad } U = \left( \frac{\partial U}{\partial x}; \frac{\partial U}{\partial y} \right) = (e^x; -e^y) = \mathbf{H}$$

Таким образом,  $U(R) = e^{R_x} - e^{R_y}$  – потенциал векторного поля  $\mathbf{H}$ .

## Определение

Эквипотенциальная линия – совокупность точек поля, имеющих один и тот же потенциал.

Для нахождения уравнения линий уровня потенциала зафиксируем уровень потенциала  $C$  и выразим  $y$  через  $x$

$$U(x, y) = e^x - e^y = C \iff e^y = e^x - C$$

Прологарифмируем уравнение с обеих сторон и получим

$$y = \ln(e^x - C) \quad e^x > C \Rightarrow x > \ln(C) \quad (2)$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы



# Линии уровня потенциала

На рис. 2 представлены графики функций (1) черным цветом и (2) разными цветами для  $C = e^1, e^2, \dots, e^9$



Рис. 2: Линии уровня потенциала поля  $H$

# Работа поля вдоль линии

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Зафиксируем точки  $A = (-5; 10)$  и  $B = (5; -5)$ . Найдем работу поля  $\mathbf{H}$  вдоль векторной линии, проходящей через эти точки.

Тогда работа поля вдоль линии будет равна:

$$\begin{aligned}\int_{AB} \mathbf{H} ds &= U(B) - U(A) = (e^{B_x} - e^{B_y}) - (e^{A_x} - e^{A_y}) = \\ &= (e^5 - e^{-5}) - (e^{-5} - e^{10}) = e^5 - 2e^{-5} + e^{10} = \\ &\approx 22174.86548\end{aligned}$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Вывод по задаче

- ▶ Установили, что  $H$  — потенциально
- ▶ Нашли уравнения векторных линий
- ▶ Нашли потенциал поля
- ▶ Нашли уравнение линий уровня потенциала
- ▶ Изобразили векторные линии и линии уровня потенциала графически
- ▶ Нашли работу поля вдоль векторной линии

## Задание 2. Поток векторного поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Дано тело  $T$ , ограниченное следующими поверхностями:

$$z + \sqrt{4 - x^2 - y^2} = 0 \quad x^2 + z^2 = 1 \quad x^2 + y + z^2 = 2$$

На рисунке предоставлено сечение тела  $T$  координатной плоскостью  $Oyz$ .

- ▶ Изобразите тело  $T$  на графике в пространстве.
- ▶ Вычислите поток поля

$$\mathbf{a} = (\sin zy^2)\mathbf{i} + \sqrt{2}x\mathbf{j} + (\sqrt{2+y} - 3k)\mathbf{k}$$

через боковую поверхность тела  $T$ , образованную вращением дуги  $AFEDC$  вокруг оси  $Oy$ , в направлении внешней нормали поверхности тела  $T$ .

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Вывод по задаче

РГР по  
матанализу

**Федоров,  
Горляков**

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

**Задание 2.  
Поток  
векторного поля**

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

## Задание 3. Конформные отображения

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

$$w(z) = \frac{z-1}{z+1} = 1 - \frac{2}{z+1}$$

План выполнения работы:

1. Рассмотреть конформное отображение. Определить особые точки отображения (при наличии) и указать их вид.
2. Изобразить на комплексной плоскости отображение области виртуального пространства в область физического пространства с помощью заданного преобразования.
3. Выделить действительную и мнимую части отображения для построения искривленной координатной сетки в физическом пространстве.
4. Взять обратное преобразование к заданному и проанализировать его
5. Рассчитать профиль показателя преломления используя конформное отображение

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

Проверим, является ли данное отображение конформным.

- ▶  $w(z)$  аналитична при  $z \neq -1$ .
- ▶ Для данного отображения существует обратное:

$$w^{-1}(z) = \frac{1 + w(z)}{1 - w(z)}$$

Таким образом,  $w(z)$  – биекция.

- ▶ Найдем  $w'(z)$ :

$$w'(z) = \frac{2}{(z+1)^2} \neq 0 \quad \forall z \in \mathbb{C}$$

Таким образом,  $w(z)$  является конформным отображением на  $\mathbb{C} \setminus \{1\}$ .

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Особые точки

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Функция имеет две особые точки  $z_1 = 1$  и  $z_2 = -1$ . Определим их вид. Для этого найдем производную  $w'(z)$ .

$$w'(z) = \frac{2}{(z+1)^2} \quad w(z_1) = w(1) = 0 \quad w'(z_1) = w'(1) \neq 0$$

Значит точка  $z_1 = 1$  является простым нулем. Определим вид точки  $z_2 = -1$ .

$$\lim_{z \rightarrow -1} \frac{z-1}{z+1} = \infty$$

Для функции  $g(z) = 1/w(z) = \frac{z+1}{z-1}$  точка  $z_2 = -1$  является простым нулем. Значит точка  $z_2 = -1$  является для функции  $w(z)$  полюсом первого порядка.

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы



## $\operatorname{Im} w(z)$ и $\operatorname{Re} w(z)$

Для дальнейшего изучения отображения найдем  $\operatorname{Im}(w(z))$  и  $\operatorname{Re}(w(z))$ . Пусть  $z = u + iv$ . Тогда:

$$\begin{aligned}w(z) &= w(u + iv) = 1 - \frac{2}{(u + 1) + iv} = 1 - \frac{2((u + 1) - iv)}{((u + 1) + iv)((u + 1) - iv)} = \\&= 1 - \frac{2(u + 1 - iv)}{(u + 1)^2 + v^2} = 1 - \frac{2u + 2 - 2iv}{u^2 + 2u + v^2 + 1} = \\&= 1 - \frac{2u + 2}{u^2 + 2u + v^2 + 1} - i \frac{2v}{u^2 + 2u + v^2 + 1} = \\&= \frac{u^2 + v^2 - 1}{u^2 + 2u + v^2 + 1} - i \frac{2v}{u^2 + 2u + v^2 + 1}\end{aligned}$$

$$\text{Значит } \operatorname{Re}(w(z)) = \frac{u^2 + v^2 - 1}{u^2 + 2u + v^2 + 1}, \operatorname{Im}(w(z)) = -\frac{2v}{u^2 + 2u + v^2 + 1}$$

# Прямая $v = u$

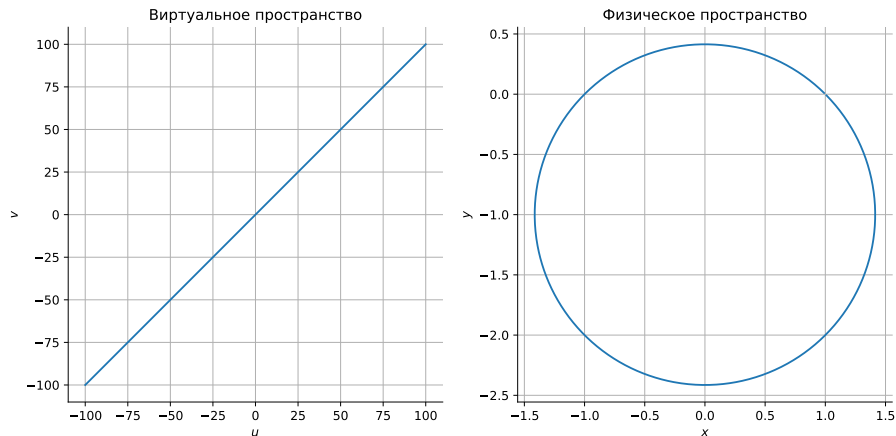


Рис. 3: Прямая  $v = u$

# Парабола $v = u^2$

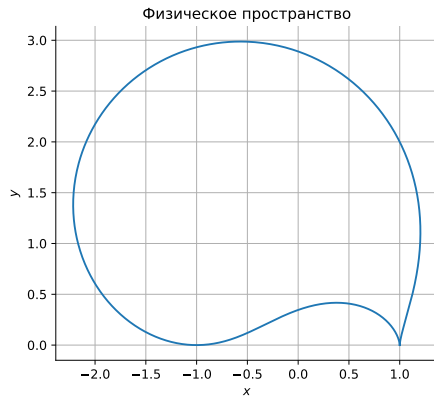
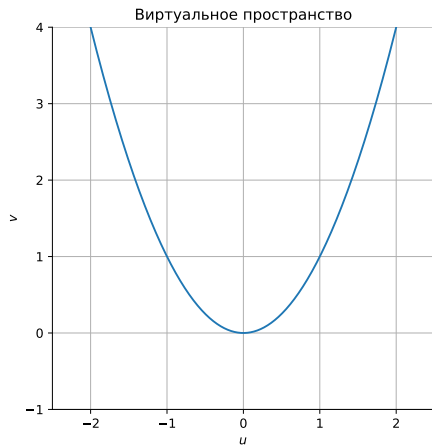


Рис. 4: Парабола  $v = u^2$

# Окружность $v^2 + u^2 = (2\sqrt{2})^2$

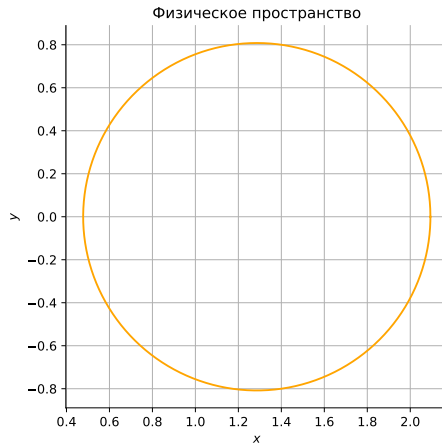
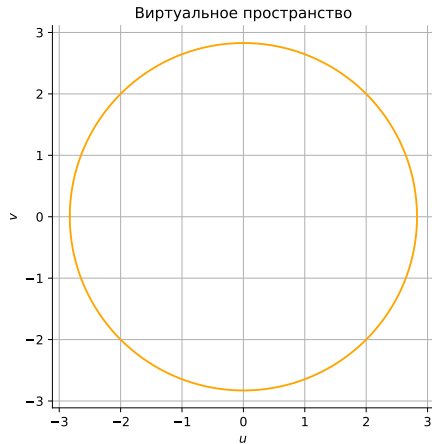


Рис. 5: Окружность  $v^2 + u^2 = (2\sqrt{2})^2$

# Координатная сетка

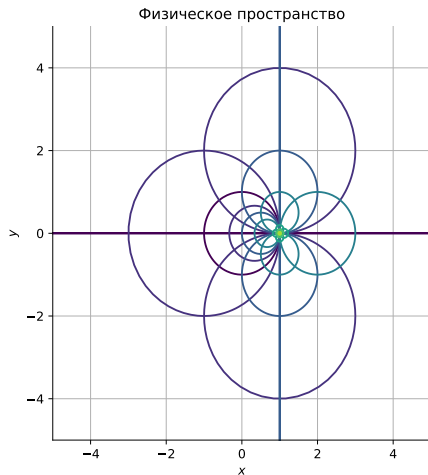
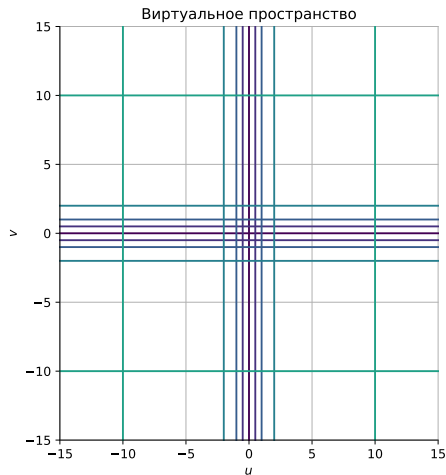


Рис. 6: Координатная сетка

# Обратное преобразование

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

Найдем для данного преобразования обратное. Для этого выразим  $z(w)$

$$w(z) = \frac{z-1}{z+1}$$
$$z(w) = \frac{1+w}{1-w} = 1 + \frac{2w}{1-w}$$

# Профиль показателя преломления

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

Для расчета профиля показателя в физическом пространстве воспользуемся формулой:

$$n_z = \left| \frac{dw}{dz} \right| n_w = \frac{2}{(x+1)^2 + y^2} \quad (3)$$

# Профиль показателя преломления

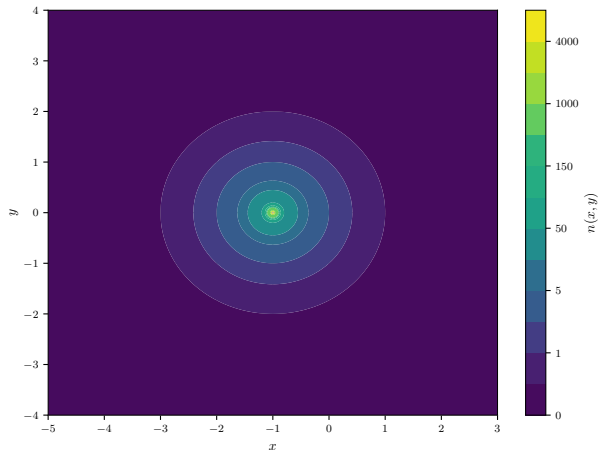


Рис. 7: Профиль показателя преломления

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы



# Вывод по задаче

РГР по  
матанализу

**Федоров,  
Горляков**

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

**Задание 3.  
Конформные  
отображения**

Вывод

Список  
литературы

# Вывод

РГР по  
матанализу

**Федоров,  
Горляков**

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

**Вывод**

Список  
литературы

# Список литературы

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

- [1] G.A. Korn и T.M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. 1968. ISBN: 9780486411477.
- [2] В. А. Зорич. *Математический анализ, часть II*. 9-е изд. МЦНМО, 2019. ISBN: 978-5-4439-1305-6.