

# 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  $\mathbb{R}^2$ .

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

## 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.

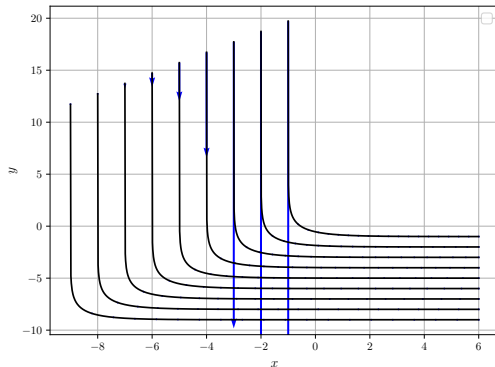


Рис. 1: Векторные линии поля  $H$

# Потенциал векторного поля

Пусть  $U(R)$  – потенциал поля  $H$ .

$$U(R) = \int_{\widehat{AR}} H dr + C \quad (2)$$

Возьмем в качестве  $A$  точку  $(0; 0)$ .  
Так как интеграл (2) не зависит от пути интегрирования, то разобьем его на две линии  $(0; 0) - (x; 0) - (x; y)$ .  
Путь интегрирования показан на рисунке 2.

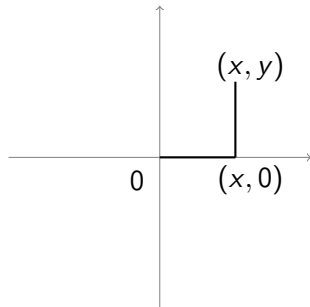


Рис. 2: Путь интегрирования

# Потенциал векторного поля: интегрирование

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

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

# 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,  $U(x, y) = e^x - e^y$  – 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

$$y = \ln(e^x - C) \quad e^x > C \Rightarrow x > \ln(C) \quad (3)$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Линии уровня потенциала

На рис. 3 представлены графики функций (1) черным цветом и (3) разными цветами для  $C = e^1, e^2, \dots, e^9$

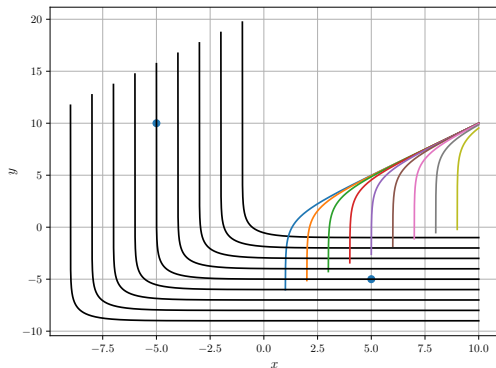


Рис. 3: Линии уровня потенциала поля  $H$

# 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

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

- ▶ 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

Дано тело  $T$ , ограниченное следующими поверхностями:

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

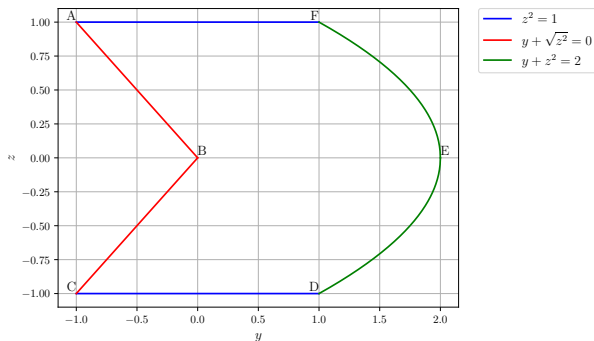


Рис. 4: Сечение тела  $T$  координатной плоскостью  $Oyz$

## Задание 2. Поток векторного поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Дано тело  $T$ , ограниченное следующими поверхностями:

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

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

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

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

# Тело $T$ на графике в пространстве

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

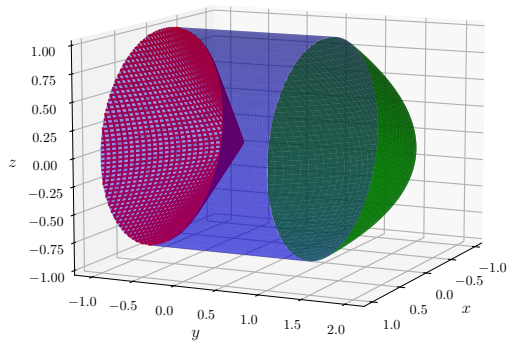


Рис. 5: Тело  $T$  в пространстве

# Элементы тела $T$ на графике в пространстве

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

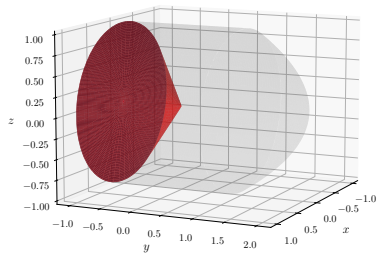


Рис. 6: Замкнутое дно тела  $T$  в пространстве

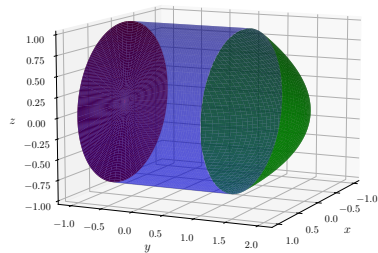


Рис. 7: Поверхность вращения дуги  $AFEDC$  вокруг оси  $Oy$



# Вычисление потока поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

Для нахождения потока искомого потока, найдем поток через тело вращения (Рис. 7) и вычтем из него поток через дно, которое замкнем (Рис. 6):

$$\Phi = \Phi_{\text{вращения}} - \Phi_{\text{дна}}$$

# Вычисление потока поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Для нахождения потока поля

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

через боковую поверхность тела  $T$ , образованную вращением дуги  $AFEDC$  вокруг оси  $Oy$ , в направлении внешней нормали поверхности тела  $T$   
Воспользуемся теоремой *Остроградского – Гаусса*:

$$\oiint_{\Sigma} (\mathbf{a}, \mathbf{n}) \, d\sigma = \iiint_V \operatorname{div} \mathbf{a} \, dx dy dz$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

Найдем дивергенцию:

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} = 0 + 0 - 3 = -3$$

Поскольку  $x^2 + z^2 = 1$  — это цилиндр, а  $x^2 + y + z^2 = 2$  — параболоид, нам удобно перейти к цилиндрическим координатам:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \\ y = y \\ z = r \cdot \sin \theta \end{cases}$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Вычисление потока поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Расставим пределы интегрирования:

$$r \in [0, 1], \theta \in [0, 2\pi], y = 2 - x^2 - z^2 = 2 - r^2$$

Тогда

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{вращения}} &= \oiint_{\Sigma} (\mathbf{a}, \mathbf{n}) d\sigma = \iiint_V -3 dV \\ &= -3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 r dr \int_0^{2-r^2} dy = -3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 (2 - r^2) r dr \\ &= -3 \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \frac{1}{4}\right) = -\frac{9}{2}\pi\end{aligned}$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Вычисление потока поля

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Расставим пределы интегрирования для конусовидного dna тела:

$$r \in [0, 1] \quad \theta \in [0, 2\pi] \quad y = -\sqrt{x^2 + z^2} = -\sqrt{r}$$

Тогда

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{дна}} &= \oiint_D (\mathbf{a}, \mathbf{n}) d\sigma = \iiint_D -3 dD \\ &= -3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 r dr \int_{-\sqrt{r}}^0 dy = -3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 r^{\frac{3}{2}} dr = -3 \cdot 2\pi \cdot \frac{2}{3} = -4\pi \\ \Phi &= \Phi_{\text{вращения}} - \Phi_{\text{дна}} = -\frac{9}{2}\pi - (-6\pi) = \frac{3}{2}\pi\end{aligned}$$

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

- ▶ Изобразили тело  $T$  на графике в трехмерном пространстве.
- ▶ Нашли дивергенцию векторного поля  $\operatorname{div} a = -3$ .
- ▶ Вычислили поток векторного поля через боковую поверхность тела

$$\Phi = -\frac{9}{2}\pi$$

## 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

## Особые точки

Отображение 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.

Таким образом, отображение является конформным за исключением точки  $z = -1$



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

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

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

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

Изучим, как под действием отображения изменяется точка на плоскости. По [ссылке](#) можно перейти на демонстрацию Geogebra, на которой находится точка  $A$  в виртуальном пространстве и соответствующая ей точка  $A' = w(A)$  в физическом пространстве. С включенным режимом трассировки, можно перемещать точку  $A$  и изучать, во что переходит соответствующая фигура.

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

Изучим, как под действием отображения изменяется координатная сетка:

1. Построим в виртуальном пространстве множество точек  
 $v = C$  – горизонтальные прямые и  $u = C$  – вертикальные прямые
2. Применим к этим точкам преобразование
3. Изобразим получившиеся точки в физическом пространстве

В приведенных на следующих слайдах графиках константа

$$C \in \{-2, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 2\}$$

# Координатная сетка (горизонтальные прямые)

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

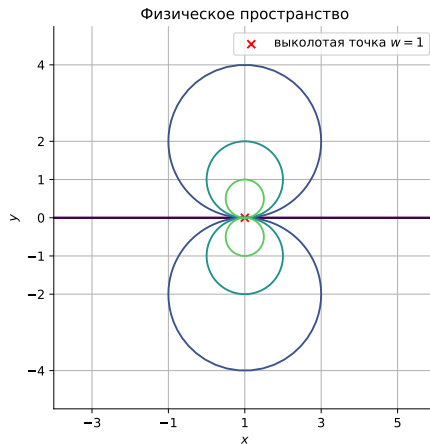
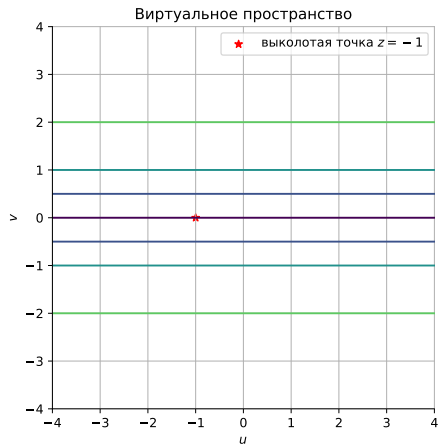


Рис. 8: Координатная сетка (горизонтальные прямые)

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Координатная сетка (вертикальные прямые)

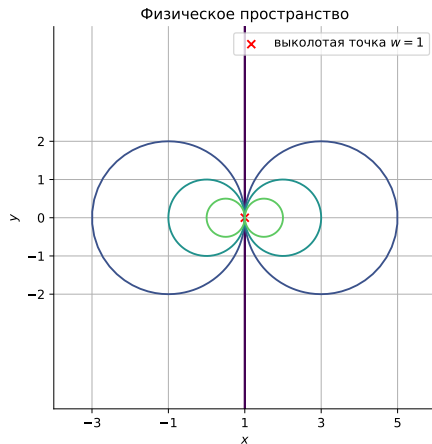
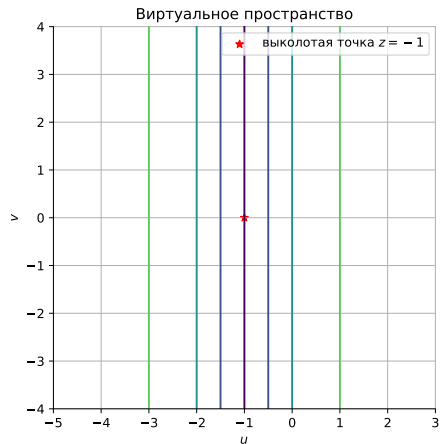


Рис. 9: Координатная сетка (вертикальные прямые)

# Координатная сетка

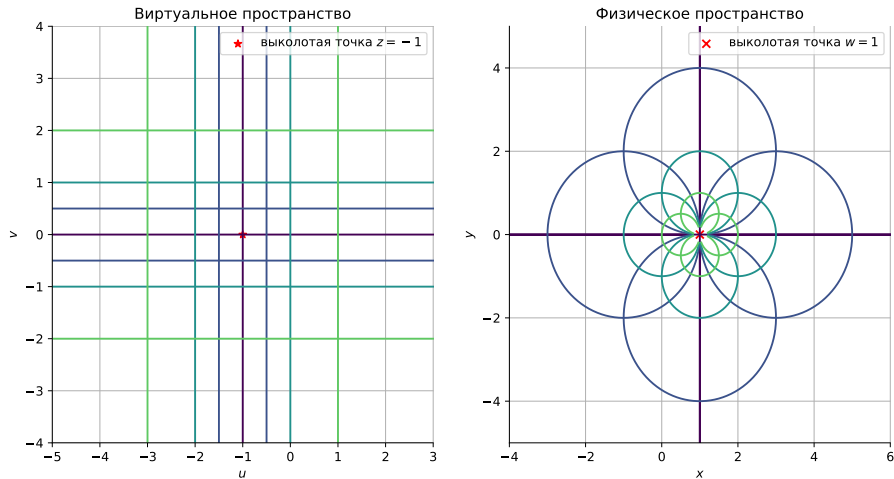


Рис. 10: Координатная сетка

# Влияние отображения на геометрические фигуры

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Изучим, как меняются геометрические фигуры под действием отображения. Как и в прошлом пункте, будем строить фигуры в виртуальном пространстве, применять к точкам, лежащим на этих фигурах отображение и строить получившиеся точки в физическом пространстве.

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

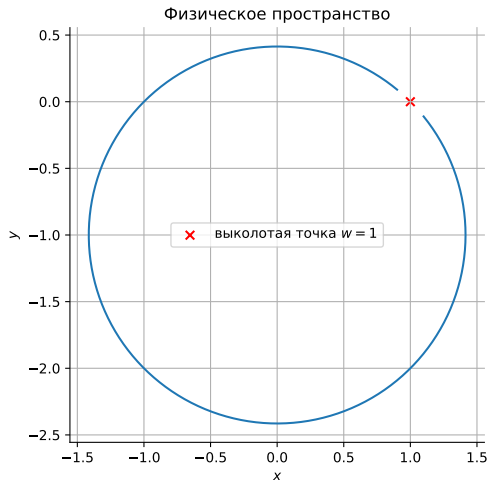
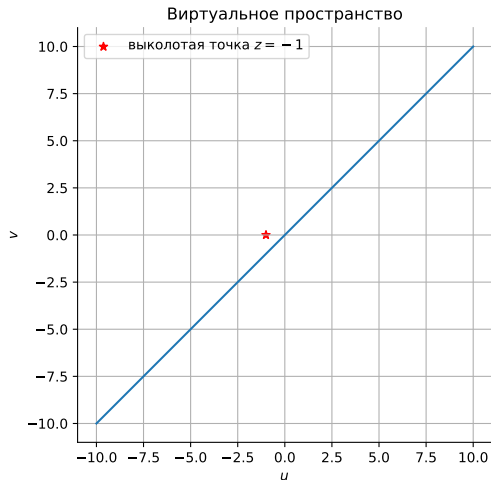
Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

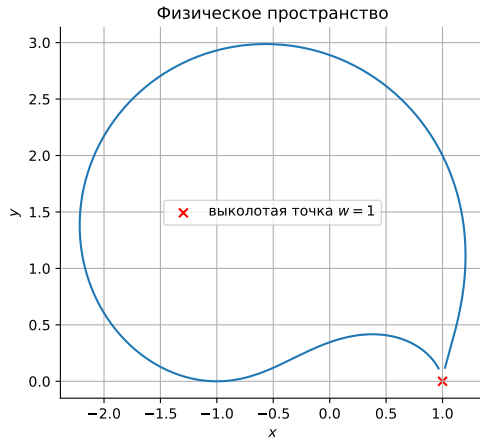
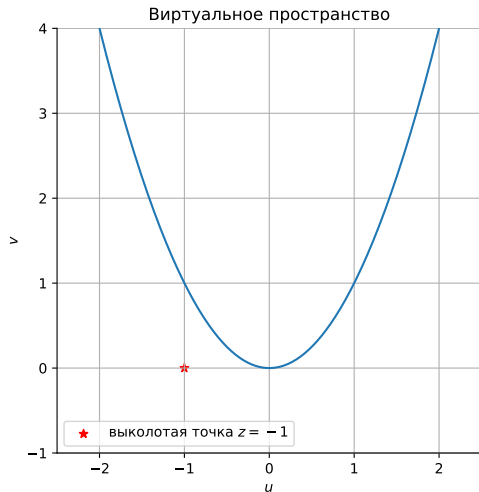
## Отрезок $u = v, u \in [-10, 10]$

Видно, что отрезок переходит в часть окружности, незамкнутую в окрестности точки  $w = 1$ . При дальнейшем увеличении отрезка окрестность будет уменьшаться.



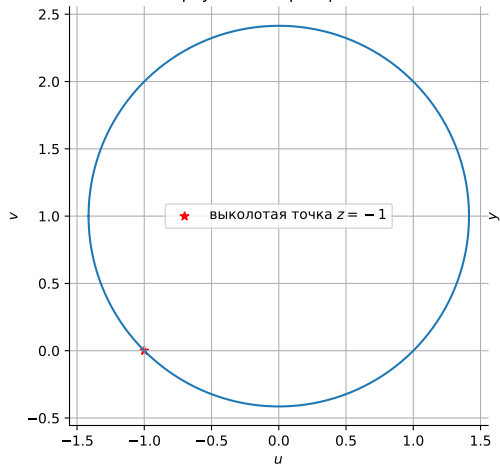


# Парабола $v = u^2$ , $u \in [-4, 4]$

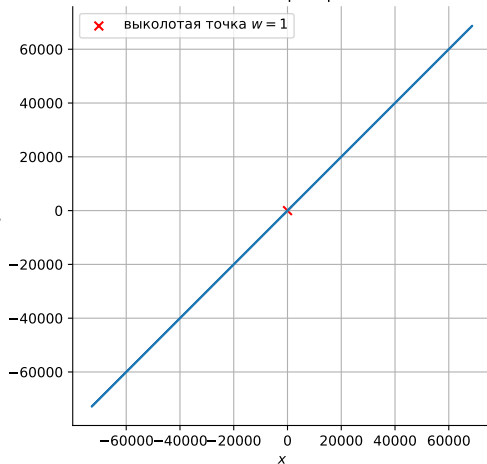


# Окружность $(v - 1)^2 + u^2 = 2$

Виртуальное пространство



Физическое пространство



РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Обратное преобразование

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

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

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

Видно, что обратное преобразование конформно за исключением простого полюса  $w = 1$ . Простым нулем обратного преобразования является точка  $w = -1$ .

Полюс  $w = 1$  и объясняет наличие выколотой точки  $w = 1$  на предыдущих графиках.

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Профиль показателя преломления

РГР по  
матанализу

Федоров,  
Горляков

Для расчета профиля показателя в физическом пространстве воспользуемся формулой:

$$n_z = \left| \frac{dw}{dz} \right| n_w = \frac{2}{(x+1)^2 + y^2} \quad (4)$$

Задание 1.  
Потенциал  
векторного поля

Задание 2.  
Поток  
векторного поля

Задание 3.  
Конформные  
отображения

Вывод

Список  
литературы

# Профиль показателя преломления

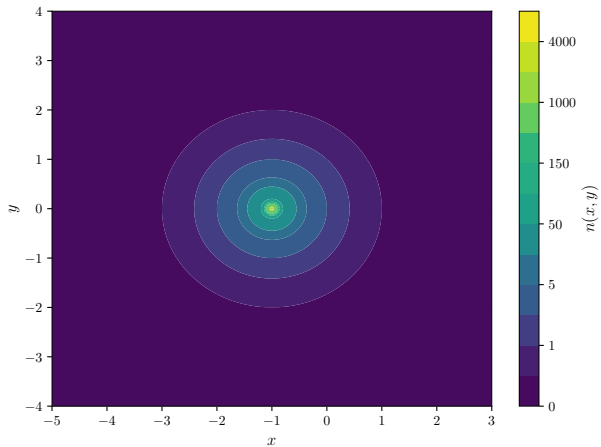


Рис. 11: Профиль показателя преломления

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

- ▶ Определили особые точки отображения
- ▶ Изобразили действие отображения на разные кривые
- ▶ Проанализировали обратное преобразование
- ▶ Рассчитали профиль показателя преобразования, построили его график

- ▶ Изучили понятие потенциала векторного поля, способ его нахождения и применение
- ▶ Изучили понятие потока векторного поля через боковую поверхность тела, теорему Остроградского-Гаусса и ее применение
- ▶ Изучили применение ТФКП для конформных отображений, изучили, во что переходят разные фигуры, научились рассчитывать профиль показателя преобразования.

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.