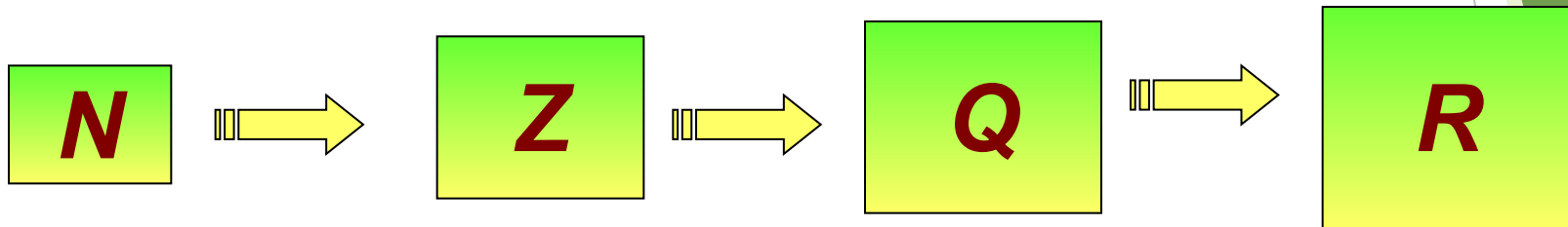


# Комплексные числа

Какие числовые множества вам знакомы?



$$N \subset Z \subset Q \subset R$$

<b>Числовая система</b>	<b>Допустимые алгебраические операции</b>	<b>Частично допустимые алгебраические операции</b>
<b>Натуральные числа, <math>\mathbb{N}</math></b>	<b>Сложение, умножение</b>	<b>Вычитание, деление, извлечение корней</b>
<b>Целые числа, <math>\mathbb{Z}</math></b>	<b>Сложение, вычитание, умножение</b>	<b>Деление, извлечение корней</b>
<b>Рациональные числа, <math>\mathbb{Q}</math></b>	<b>Сложение, вычитание, умножение, деление</b>	<b>Извлечение корней из неотрицательных чисел</b>
<b>Действительные числа, <math>\mathbb{R}</math></b>	<b>Сложение, вычитание, умножение, деление, извлечение корней из неотрицательных чисел</b>	<b>Извлечение корней из произвольных чисел</b>
<b>Комплексные числа, <math>\mathbb{C}</math></b>	<b>Все операции</b>	

## Минимальные условия, которым должны удовлетворять комплексные числа:

$C_1$ ) Существует комплексное число, квадрат которого равен **-1** .

$C_2$ ) Множество комплексных чисел содержит все действительные числа.

$C_3$ ) Операции сложения, вычитания, умножения и деления комплексных чисел удовлетворяют обычным законам арифметических действий (сочетательному, переместительному, распределительному).

Выполнение этих минимальных условий позволяет определить все множество  $C$  комплексных чисел.

# Мнимые числа

$$i^2 = -1, i \text{ — мнимая единица}$$

$i, 2i, -0,3i$  — чисто мнимые числа

Арифметические операции над чисто мнимыми числами выполняются в соответствии с условием СЗ.

$$3i + 13i = (3 + 13)i = 16i$$

$$3i \cdot 13i = (3 \cdot 13)(i \cdot i) = 39i^2 = -39$$

$$i^7 = (i^2)^3 \cdot i = -i$$

В общем виде правила арифметических операций с чисто мнимыми числами таковы:

$$ai + bi = (a + b)i;$$

$$ai - bi = (a - b)i;$$

$$a(bi) = (ab)i;$$

$$(ai)(bi) = abi^2 = -a$$

где  $a$  и  $b$  — действительные числа.

**Определение 1.** Комплексным числом называют сумму действительного числа и чисто мнимого числа.

$$i^2 = -1, i - \text{мнимая единица}$$

**Определение 2.** Два комплексных числа называют равными, если равны их действительные части и равны их мнимые части:

$$a + bi = c + di \Leftrightarrow a = c, b = d.$$

# Арифметические операции над комплексными числами

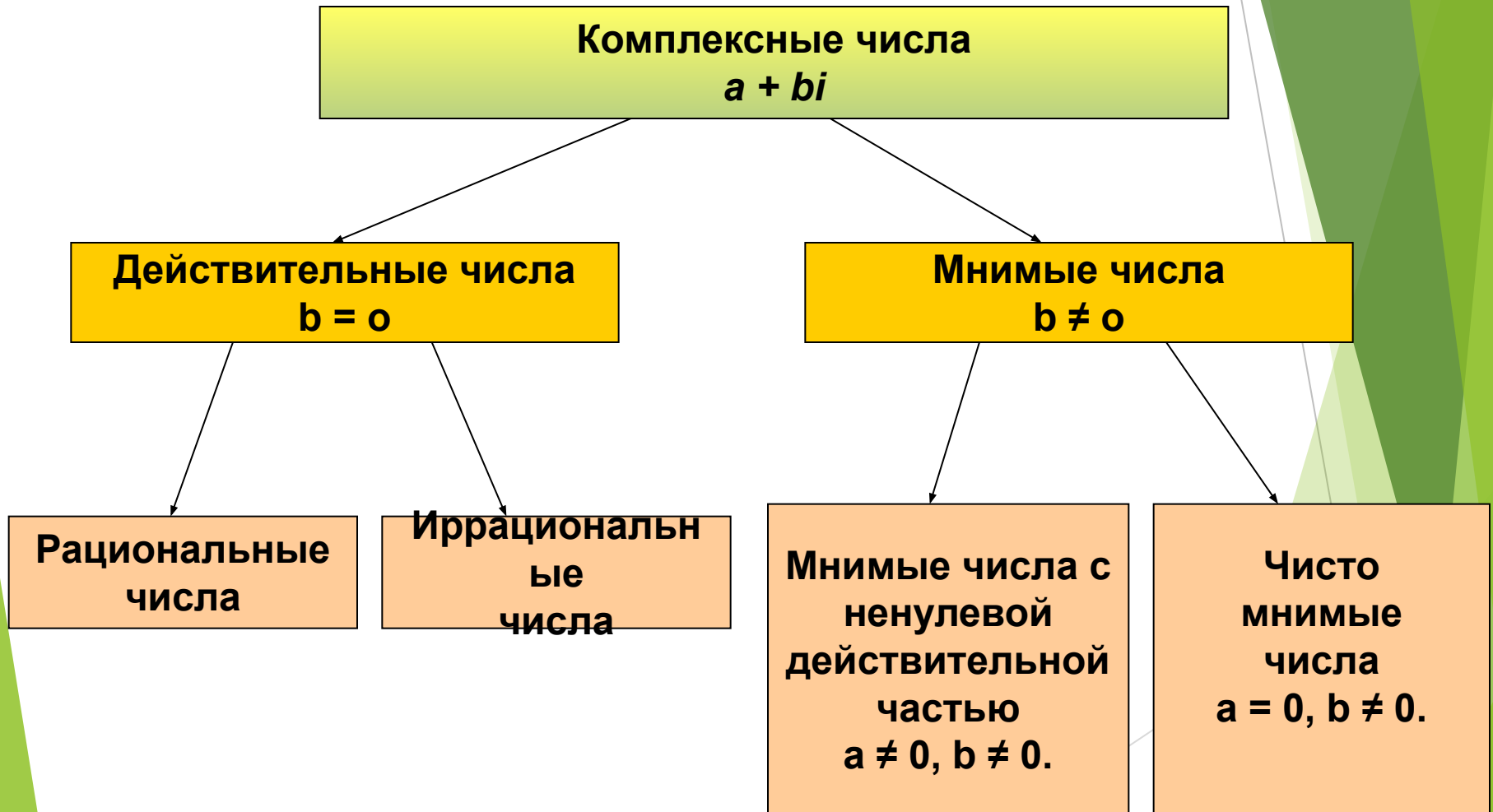
$$(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i$$

$$(a + bi) - (c + di) = (a - c) + (b - d)i$$

$$(a + bi) \cdot (c + di) = (ac - bd) + (ad + bc)i$$

$$\frac{a + bi}{c + di} = \frac{(a + bi)(c - di)}{(c + di)(c - di)} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}i$$

# Классификация комплексных чисел





# Сопряженные комплексные числа

**Определение:** Если у комплексного числа сохранить действительную часть и поменять знак у мнимой части, то получится комплексное число, **сопряженное данному**.

Если данное комплексное число обозначается буквой  $z$ , то сопряженное число обозначается  $\bar{z}$  :

$$z = x + yi \Rightarrow \bar{z} = x - yi$$

**Из всех комплексных чисел действительные числа (и только они) равны своим сопряженным числам.**

**Числа  $a + bi$  и  $a - bi$  называются взаимно сопряженными комплексными числами.**

# Свойства сопряженных чисел

1. Сумма и произведение двух сопряженных чисел есть число действительное.

$$z + \bar{z} = (a + bi) + (a - bi) = 2a$$

$$z \cdot \bar{z} = (a + bi)(a - bi) = a^2 - (bi)^2 = a^2 + b^2$$

2. Число, сопряженное сумме двух комплексных чисел, равно сумме сопряженных данным числам.

$$\overline{z_1 + z_2} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2$$

3. Число, сопряженное разности двух комплексных чисел, равно разности сопряженных данным числам.

$$\overline{z_1 - z_2} = \bar{z}_1 - \bar{z}_2$$

4. Число, сопряженное произведению двух комплексных чисел, равно произведению сопряженных данным числам.

$$\overline{z_1 z_2} = \bar{z}_1 \bar{z}_2$$

# Свойства сопряженных чисел

5. Число, сопряженное  $n$ -ой степени комплексного числа  $z$ , равно  $n$ -ой степени числа, сопряженного к числу  $z$ , т.е.

$$\overline{z^n} = (\bar{z})^n, \quad n \in \mathbb{N}$$

6. Число, сопряженное частному двух комплексных чисел, из которых делитель отличен от нуля, равно частному сопряженных чисел, т.е.

$$\overline{\left( \frac{a + bi}{c + di} \right)} = \frac{\overline{(a + bi)}}{\overline{(c + di)}}$$

# Степени мнимой единицы

По определению первой степенью числа  $i$  является само число  $i$ , а второй степенью – число  $-1$ :

$$i^1 = i, i^2 = -1$$

Более высокие степени числа  $i$  находятся следующим образом:

$$i^4 = i^3 \cdot i = -i^2 = 1;$$

$$i^5 = i^4 \cdot i = i;$$

$$i^6 = i^5 \cdot i = i^2 = -1 \text{ и т.д.}$$

Очевидно, что при любом натуральном  $n$

$$i^{4n} = 1;$$

$$i^{4n+2} = -1$$

$$i^{4n+1} = i;$$

$$i^{4n+3} = -i.$$

# Извлечение квадратных корней из комплексных чисел в алгебраической форме.

- ▶ **Определение.** Число  $w$  называют квадратным корнем из комплексного числа  $z$ , если его квадрат равен  $z$ :  $w^2 = z$
- ▶ **Теорема.** Пусть  $z = a + bi$  - отличное от нуля комплексное число. Тогда существуют два взаимно противоположных комплексных числа, квадраты которых равны  $z$ . Если  $b \neq 0$ , то эти два числа выражаются формулой:

$$w = \pm \left[ \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{2}} + i \cdot \operatorname{sign} b \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}} \right], \text{ где}$$

$$\operatorname{sign} b = \begin{cases} 1, & \text{если } b > 0 \\ -1, & \text{если } b < 0 \\ 0, & \text{если } b = 0 \end{cases}$$

При  $b = 0, a > 0$  имеем:  $w = \pm\sqrt{a}$ , при  $b = 0, a < 0$  имеем:  $w = \pm i\sqrt{|a|}$ .

# Геометрическое изображение комплексных чисел.

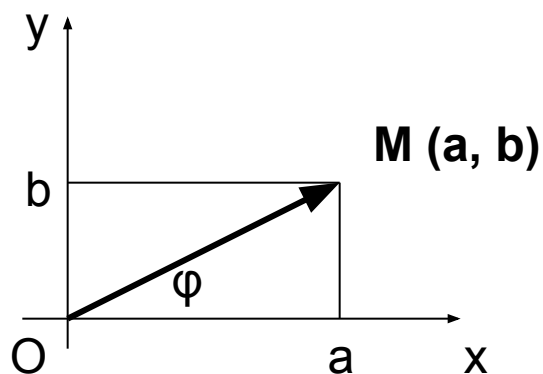
**Комплексному числу  $z$  на координатной плоскости соответствует точка  $M(a, b)$ .**

**Часто вместо точек на плоскости берут их радиусы-векторы**

**Определение:** Модулем комплексного числа  $z = a + bi$

называют неотрицательное число  $\sqrt{a^2 + b^2}$ , равное расстоянию от точки  $M$  до начала координат

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$



$$\cos \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{и} \quad \sin \varphi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$\varphi$  – аргумент комплексного числа

$$\varphi \in (-\pi; \pi]$$

# Тригонометрическая форма комплексного числа

$$z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

где  $\varphi$  – аргумент комплексного числа,

$r = \sqrt{a^2 + b^2}$  – модуль комплексного числа,

$$\cos \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{и} \quad \sin \varphi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

## Умножение и деление комплексных чисел, заданных в тригонометрической форме

### **Теорема 1.**

Если  $z_1 \neq 0, z_2 \neq 0$  и  
 $z_1 = r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1), z_2 = r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)$ , то:

а)  $z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2))$

б)  $\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} (\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 - \varphi_2))$

### **Теорема 2 (формула Муавра).**

Пусть  $z$  — любое отличное от нуля комплексное число,  $n$  — любое целое число.

Тогда

$$z^n = (r(\cos \varphi + i \sin \varphi))^n = r^n (\cos n\varphi + i \sin n\varphi).$$



# Извлечение корня из комплексного числа.

- **Теорема.** Для любого натурального числа  $n$  и отличного от нуля комплексного числа  $z$  существуют  $n$  различных значений корня  $n$ -степени.

Если

$$z = r(\cos \alpha + i \sin \alpha),$$

то эти значения выражаются формулой

$$w_k = \sqrt[n]{r} \left( \cos \frac{\alpha + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\alpha + 2\pi k}{n} \right),$$

где  $k = 0, 1, \dots, (n-1)$

# После изучения темы «Комплексные числа учащиеся должны:

## **Знать:**

- алгебраическую, геометрическую и тригонометрическую формы комплексного числа.

## **Уметь:**

- производить над комплексными числами операции сложения, умножения, вычитания, деления, возведения в степень, извлечение корня из комплексного числа;
- переводить комплексные числа из алгебраической формы в геометрическую и тригонометрическую;
- пользоваться геометрической интерпретацией комплексных чисел;
- в простейших случаях находить комплексные корни уравнений с действительными коэффициентами.