

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ФАКУЛЬТЕТ КОМПЬЮТЕРНЫХ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

Допущена к защите
Заведующей кафедрой ПМИ
_____ Е.В.Разова

ПРИЛОЖЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ К РЕШЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Курсовой проект по дисциплине «Проектная и научно-исследовательская
деятельность»

Выполнил студент группы ПМИб-2301-52-00 _____ /Г.Е. Ступников/
Руководитель к.ф-м.н. доцент кафедры ПМИ _____ /И.А. Пушкарев/

Работа защищена с оценкой _____ . _____.2022

КИРОВ 2022 г.

Содержание

Введение	3
Основные обозначения.	5
Решение и разбор задач с применением метода	7
Заключение	33
Список литературы	34
Приложения	35
Приложение А. Листинг программы	35

Введение

В настоящее время в большом количестве прикладных и научных областей возникает необходимость решения задач, которые могут быть разрешены с помощью математики [3], и, как частный случай, геометрии. Основные из них - производство различных деталей и конструкций, моделирование различных объектов и явлений [4, стр. 15]. В данных областях возникает потребность поиска эффективного решения поставленных задач, что подразумевает выборку оптимального метода решения или соотношения между ними.

В основном геометрические задачи решаются алгебраически [5], т.е. для решения задачи достаточно решить некоторое уравнение или путем преобразований доказать истинность некоторого утверждения, то есть вычислить ответ (процесс доказательства тоже можно считать вычислением, основанном на законах логики [2, стр. 8]). Зачастую при решении задач строятся вспомогательные изображения, содержащие исходные данные и помогающие выявить взаимосвязи между различными объектами, а также в наглядной форме представить их свойства.

Метод комплексных чисел является расширением алгебраического метода. Он позволяет представить геометрические объекты 2-мерной плоскости в виде набора комплексных чисел и равенств, отражающих взаимосвязи между ними [7, стр. 3]. Данный метод достаточно контринтуитивен и сложен для самостоятельного изучения (особенно непривычно выглядит спиральное подобие как геом. ипостась умножения), при этом он не рассматривается в школах на уровне основной программы [9],[1, стр.6].

Проблема состоит в том, что для данного метода отсутствуют материалы для внедрения в среду самостоятельного и школьного обучения, включающие программы, облегчающие изучение метода.

Целью данной работы является изучение метода комплексных чисел при решении геометрических задач, реализация программной верификации решения выбранных задач.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучить имеющиеся способы применения алгебры комплексных чисел при решении геометрических задач.
2. Выбрать задачи, на которых будет рассматриваться практическое применение метода.
3. Решение задач с применением метода комплексных чисел
4. Реализация программной верификации решения задач с применением метода.

Основные обозначения

Комплексное число z — число вида $x + iy$, где $x, y \in \mathbf{R}, i = \sqrt{-1}, z \in \mathbf{C}, \mathbf{C}$ — поле комплексных чисел. У числа z можно выделить действительную $x = \operatorname{Re}(z)$ и мнимую $y = \operatorname{Im}(z)$ части [6, стр. 357].

На плоскости зададим прямоугольную декартову систему координат Oxy и отображение $f : M(x; y) \leftrightarrow z = x + iy$, где $M \in \mathbf{P}$ — точка плоскости с координатами $x, y \in \mathbf{R}, \mathbf{P}$ — множество точек евклидовой плоскости. Комплексное число z называют комплексной координатой соответствующей точки M и пишут $M(z)$. Отображение f биективно. Метод комплексных чисел основан на данном факте. Таким образом, свойства и операции комплексных чисел можно перенести на прямоугольную декартову систему координат евклидовой плоскости.

При решении задач часто оказываются полезны следующие свойства комплексных чисел:

1. Модуль числа $z = |z| = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = r$ — расстояние между точкой O и M (рис. 1). При этом $z\bar{z} = |z|^2$.
2. Если $\angle\varphi$ — ориентированный, образованный \overrightarrow{OM} с осью Ox , то $x_0 = r \cos \varphi$, $y_0 = r \sin \varphi$ (из определения функций). Тогда $z_0 = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$. Такое представление комплексного числа называют тригонометрическим.
3. $\arg z = \angle\varphi$.
4. Если существует вектор \overrightarrow{OM} (точка O — начало координат), то отображение $M(z) \rightarrow OM$ биективно [8, стр. 32].
5. Из свойств операций над векторами следует, что сумме и разности векторов однозначно соответствуют сумма и разность соответствующих им комплексных чисел.
6. 2 точки коллинеарны тогда и только тогда, когда коллинеарны соответствующие им векторы. Векторы коллинеарны, если угол между ними $= 0^\circ$ или

180° , т.е $\arg z_1 - \arg z_2 = \pm\pi$. Т.к z_3 с $\arg z_3 = \arg z_1 - \arg z_2 = \pm\pi$ должно быть действительными, для коллинеарности двух точек достаточно выполнения условия

$$\frac{a}{b} = \frac{\bar{a}}{\bar{b}}.$$

7. 2 точки перпендикулярны тогда и только тогда, когда перпендикулярны соответствующие им векторы. Векторы перпендикулярны, если угол между ними $= 90^\circ$ или 270° , т.е $\arg z_1 - \arg z_2 = \pm\frac{\pi}{2}$. Т.к z_3 с $\arg z_3 = \arg z_1 - \arg z_2 = \pm\frac{\pi}{2}$ должно быть чисто мнимым, для перпендикулярности двух точек достаточно выполнения условия

$$\frac{a}{b} = -\frac{\bar{a}}{\bar{b}}.$$

8. Расстояние между 2 точками соответствует длине вектора, построенного на этих двух точках. Таким образом, $\overrightarrow{AB} = |a - b| = \sqrt{(a - b)(\bar{a} - \bar{b})}$. Т.к. окружность можно описать как “множество точек z , равноудаленных от центра a на расстояние R ”, уравнение окружности имеет вид $(z - a)(\bar{z} - \bar{a}) = R^2$.

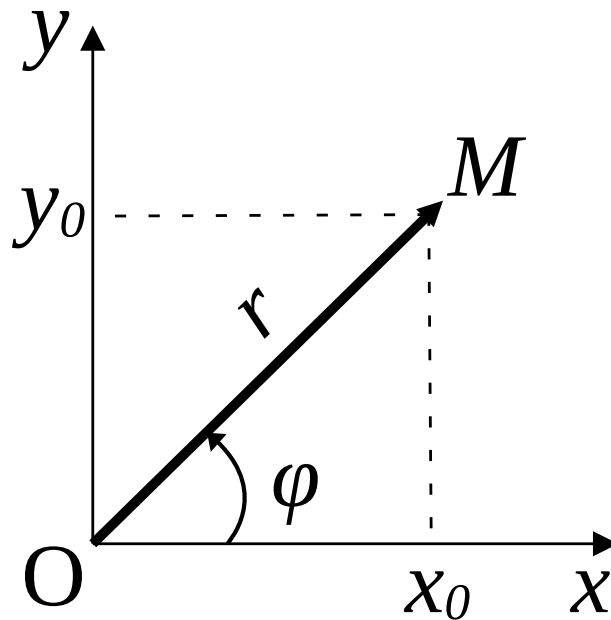


Рис. 1: Изображение числа z на плоскости

Решение и разбор задач с применением метода

Задача 1

Постановка задачи: Точка D симметрична центру описанной около треугольника ABC окружности, относительно прямой AB . Доказать, что расстояние CD выражается формулой

$$CD^2 = R^2 + AC^2 + BC^2 - AB^2 \quad (1)$$

где R - радиус описанной окружности.



Рис. 2: Иллюстрация к задаче

Решение задачи: За начало координат плоскости будем считать точку O — центр описанной около треугольника ABC окружности. Уравнение данной окружности имеет вид $z\bar{z} = |z|^2 = x^2 + y^2 = R^2$, где $z \in \mathbb{C}$. Рассмотрим четырехугольник $OADB$: $OA = AD = OB = BD$ по условию задачи и отрезки AB, OD пересекаются под прямым углом, следовательно, $OADB$ — ромб. На основании данного факта верно

следующее утверждение — $d = a + b$. Тогда

$$CD^2 = (d-c)(\bar{d}-\bar{c}) = (a+b-c)(\bar{a}+\bar{b}-\bar{c}) = 3R^2 + (a\bar{b} + \bar{a}b) - (a\bar{c} + \bar{a}c) - (b\bar{c} + \bar{b}c). \quad (2)$$

Этому же выражению равна правая часть доказываемого равенства:

$$\begin{aligned} R^2 + AC^2 + BC^2 - AB^2 &= R^2 + (a-c)(\bar{a}-\bar{c}) + (b-c)(\bar{b}-\bar{c}) - (a-b)(\bar{a}-\bar{b}) = \\ &= 3R^2 - (a\bar{c} + \bar{a}c) - (b\bar{c} + \bar{b}c) + (a\bar{b} + \bar{a}b) \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом утверждение 1 верно, что и требовалось доказать.

Вычислительная иллюстрация на частном случае: На вход программы передаются координаты свободных точек комплексной плоскости, в данном примере это координаты точек A, B, C . Если A, B, C не лежат на одной прямой, то по данным входным данным строится описанная окружность и точки O, D . Если условие 1 выполняется, то задача считается решенной для данных входных данных и на экран выводятся координаты точек O, D , а также координаты всех остальных. Блок-схема алгоритма приведена на Рис. 3.

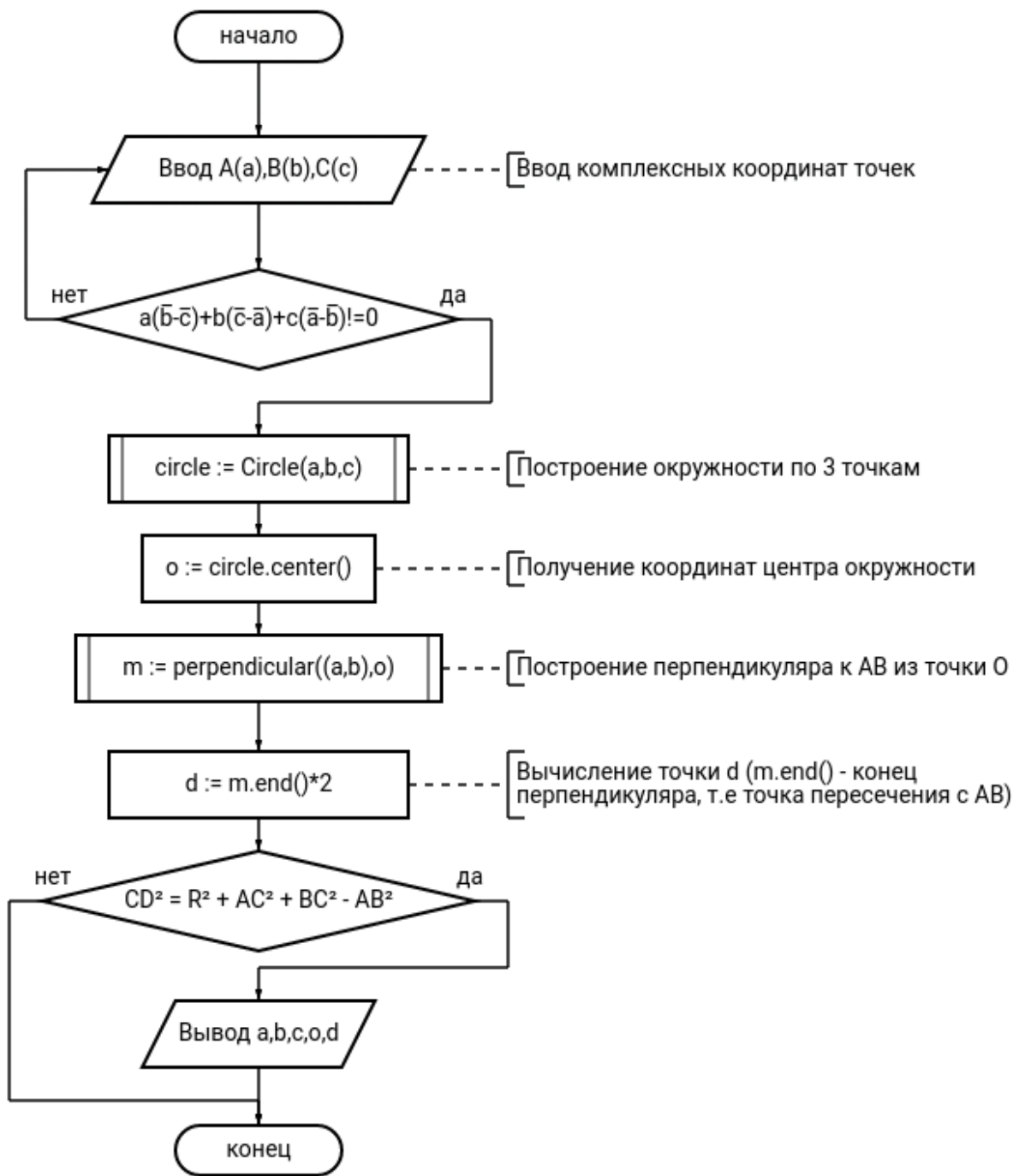


Рис. 3: Блок-схема алгоритма программы

Программная реализация задачи: Решение задачи написано на языке C++ в виде части программы для решения задач из данной работы. Реализация алгоритма программы предоставлена в функции `task1::solve` (файл `task1.cpp`):

```

* the output format.
*/
inline void task1::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{

```

```

/**
 * @brief Numbers should differs lesser than comparePrecision
 */
const double comparePrecision = 0.1;
/**
 * @brief Amount digits after decimal separator
 */
const int8_t roundPrecision = 2;
returnCode = 0;
/**
 * @brief The amount of numbers.
 */
const int numbersCount = 5;
/**
 * @brief Random constant values. They need for get x() or y() values of
 * lines kind of 'y = const' or 'x = const'
 */
const int &randX = numbersCount, &randY = numbersCount;
ComplexNumber numbers[numbersCount];
const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D", "O" };
// clang-format off
// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
                &b = numbers[1],
                &c = numbers[2],
                &d = numbers[3],
                &o = numbers[4];
// clang-format on
/**
 * @brief Reading points from user. This function assign values to numbers
 * array.
 */
readTriangleFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
    return;
Circle circle { a.toPoint(), b.toPoint(), c.toPoint() };
o = ComplexNumber::round({ circle.center() }, roundPrecision);
const Line AB { a, b };
const Line p = Line::makePerpendicular(AB, o.toPoint());
const Point i = Line::intersect(AB, p);
/**

```

```

* @brief Calculating d (it depends line type of p)
*/
switch (p.getType()) {
    case LineType::CONST_X:
        d = Point { p.x(randY), -o.toPoint().Y() + 2 * i.Y() };
        break;
    case LineType::CONST_Y:
        d = Point { -o.toPoint().X() + 2 * i.X(), p.y(randX) };
        break;
    case LineType::NORMAL:
        d =
            Point { -o.toPoint().X() + 2 * i.X(), -o.toPoint().Y() + 2 * i.Y() };
        break;
}
d = ComplexNumber::round(d, roundPrecision);
const LineSegment sCD { c.toPoint(), d.toPoint() },
    sAC { a.toPoint(), c.toPoint() }, sBC { b.toPoint(), c.toPoint() },
    sAB { a.toPoint(), b.toPoint() };
// Check 'CD^2 = R^2 + AC^2 + BC^2 - AB^2'
const double lhs = power(sCD.length(), 2);
const double rhs = power(circle.radius(), 2) + power(sAC.length(), 2) +
    power(sBC.length(), 2) - power(sAB.length(), 2);
if (areEqual(lhs, rhs, comparePrecision)) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << "CD^2 != R^2 + AC^2 + BC^2 - AB^2.\n";
}

```

Листинг 1: Функция task1::solve

Программа поддерживает запуск нескольких заданий из командной строки. Для этого нужно через пробел ввести каждое из них (так, запуск приложения с параметрами '1 2 3 3') произведет последовательный запуск задач 1,2,3 (задача №3 запускается дважды). Для вывода информации в виде, пригодным для считывания сторонними программами, необходимо задать параметр '-d' (он должен быть первым. Пример: '-d 1 2').

Демонстрация работы:

```
[codetest] ./realease.app 1
```

```

Task #1
Enter coordinates of triangle's points:
A: 0 0
B: 4 0
C: 2 3.24
Computed coordinates:
A: 0 + 0i
B: 4 + 0i
C: 2 + 3.24i
D: 2 + -1i
O: 2 + 1i
-----

```

Задача 2

Постановка задачи: Точка M — середина дуги AB окружности. Доказать, что для произвольной точки N этой окружности имеет место равенство

$$|AM^2 - MN^2| = AN \cdot BN. \quad (4)$$

Решение задачи: Пусть точкам A, B, M, N соответствуют комплексные числа a, b, m, n . Для упрощения доказательства возьмем дугу AB такую, что $a = \bar{b}, b = \bar{a}$ и $m = 1 + i0 = 1$ соответственно, и окружность радиуса $r = 1$. За начало координат примем центр окружности (см рис. 4). Тогда уравнение окружности имеет вид $z\bar{z} = 1$, и поэтому $a = \bar{b}, b = \bar{a}$.

Находим: $AN \cdot BN = |a - n| \cdot |b - n| = |(a - n)(\bar{a} - \bar{n})| = |a\bar{a} - na - n\bar{a} + n^2| = |1 + n^2 - n(a + \bar{a})|$.

Так как $AM^2 = (a - 1)(\bar{a} - 1)$ и $MN^2 = (n - 1)(\bar{n} - 1)$, то $|AM^2 - MN^2| = |n + \bar{n} - (a + \bar{a})|$. Умножив это равенство на $|n| = 1$, получим: $|AM^2 - MN^2| = |n^2 + 1 - n(a + \bar{a})| = AN \cdot BN$.

Вычислительная иллюстрация на частном случае: Строится окружность радиуса $r = 1$. На вход программы передаются координаты свободных точек комплексной плоскости, в данном примере это координаты точек A, B, N , а также вспомогательная точка T ($T \in AB$), которая нужна для однозначного построения дуги. Если A, B, N принадлежат построенной окружности, то по данным входным данным

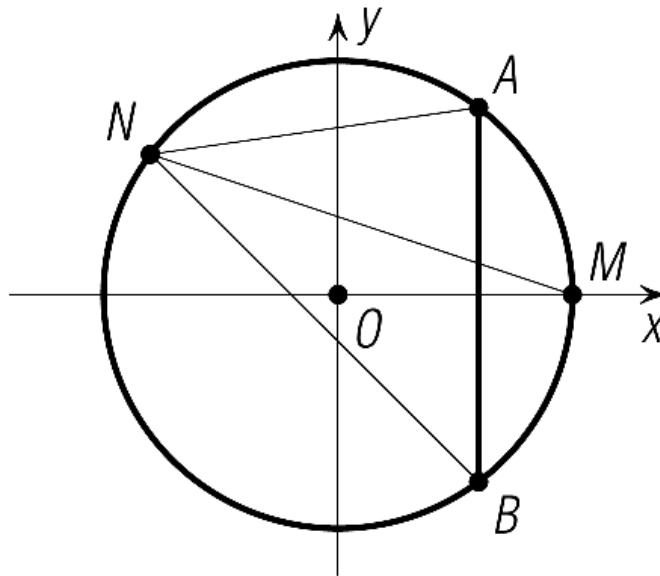


Рис. 4: Иллюстрация к доказательству

вычисляются координаты точки M . Если условие задачи (4) выполняется, то задача считается решенной для данных входных данных и на экран выводятся координаты точки M , а также координаты всех остальных. Блок-схема алгоритма приведена на Рис. 5.

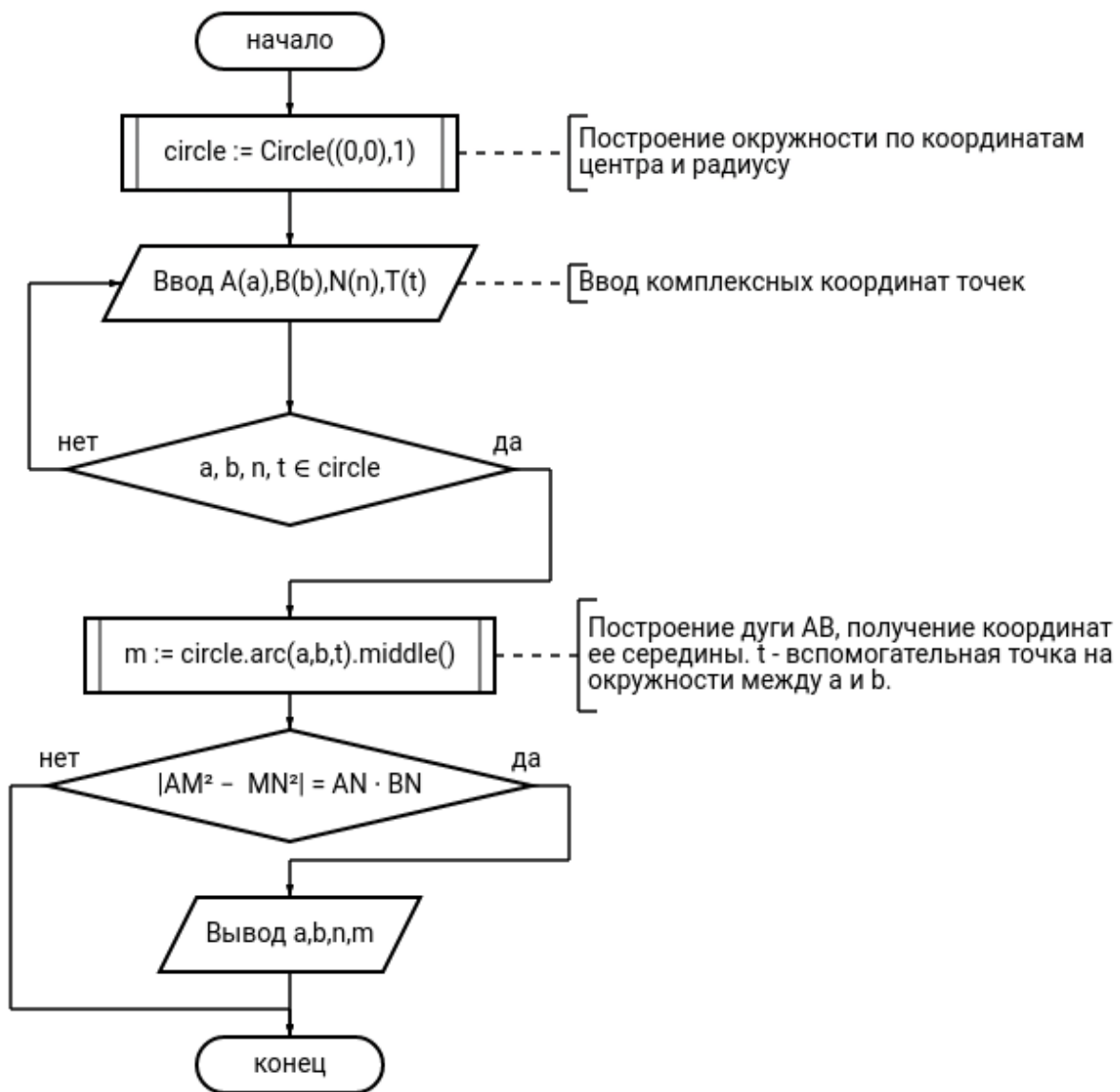


Рис. 5: Блок-схема алгоритма программы

Программная реализация задачи: Решение задачи написано на языке C++ в виде части программы для решения задач из данной работы. Реализация алгоритма программы предоставлена в функции `task2::solve` (файл `task2.cpp`):

```

inline void task2::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision digits after decimal
     * separator.
     */
    const uint8_t comparePrecision = 1;
    const int numbersCount = 5;

```

```

const uint32_t circleRadius = 1;
const bool useApproximation = true;
ComplexNumber numbers[numbersCount];
const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "N", "T", "M" };
// clang-format off
// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
               &b = numbers[1],
               &n = numbers[2],
               &t = numbers[3],
               &m = numbers[4];
// clang-format on
const Circle circle { Point::zero(), circleRadius };
/**
 * @brief Read the numbers until points not belongs to the circle.
 */
returnCode = 0;
do {
    readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
    if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
        return;
} while (!circle.isBelongs(a.toPoint(), comparePrecision) ||
        !circle.isBelongs(b.toPoint(), comparePrecision) ||
        !circle.isBelongs(n.toPoint(), comparePrecision));
m =
    CircleArc(circle, a.toPoint(), b.toPoint(), t.toPoint(), useApproximation)
        .middle();
const LineSegment AM { a.toPoint(), m.toPoint() },
               MN { m.toPoint(), n.toPoint() }, AN { a.toPoint(), n.toPoint() },
               BN { b.toPoint(), n.toPoint() };
// Check ' $|AM^2 - MN^2| = AN * BN$ '
if (areEqual(std::abs(power(AM.length(), 2) - power(MN.length(), 2)),
               AN.length() * BN.length(),
               static_cast< int8_t >(comparePrecision))) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << " $|AM^2 - MN^2| \neq AN * BN$ .\n";
}

```

Листинг 2: Функция task2::solve

Демонстрация работы:

```
[codetest] ./realease.app 2
Task #2
Enter coordinates of a,b,n,t points (must conform x^2+y^2 = 1, t between a and
b):
A: 0.5 0.866
B: 0.5 -0.866
N: -1 0
T: 0.707 0.707
Computed coordinates:
A: 0.5 + 0.87i
B: 0.5 + -0.87i
N: -1 + 0i
T: 0.71 + 0.71i
M: 1 + 0i
-----
```

Задача 3

Постановка задачи: Докажите, что сумма квадратов диагоналей параллелограмма равна сумме квадратов всех его сторон (Рис. 6). Таким образом, требуется доказать, что

$$AD^2 + BC^2 = AB^2 + CD^2 + BD^2 + AC^2 \quad (5)$$

Решение задачи: Зададим точку $A(a) = 0 + i \cdot 0$. Тогда верны следующие утверждения: $d = c + b$, $\overrightarrow{CB} = b - c$.

$$AB^2 + BD^2 + CD^2 + AC^2 = |b|^2 + |c|^2 + |b|^2 + |c|^2 = 2b\bar{b} + 2c\bar{c} \quad (6)$$

$$AD^2 + BC^2 = |d|^2 + |b - c|^2 = d\bar{d} + (b - c)(\bar{b} - \bar{c}) = (c + b)(\bar{c} + \bar{c}) + b\bar{b} - b\bar{c} - c\bar{b} + c\bar{c} = c\bar{c} + c\bar{b} + b\bar{c} + 2b\bar{b} + c\bar{c} - b\bar{c} - c\bar{b} = 2b\bar{b} + 2c\bar{c} \quad (7)$$

Таким образом, выражения (6) и (7) равны друг другу, что и требовалось доказать.

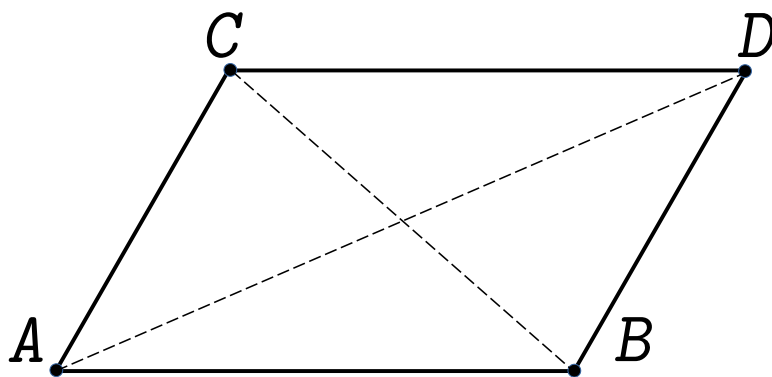


Рис. 6: Иллюстрация к задаче

Вычислительная иллюстрация на частном случае: На вход программы передаются координаты свободных точек комплексной плоскости, в данном примере это координаты точек A, B, C . Если A, B, C образуют треугольник, то по данным входным строится параллелограмм. Если условие задачи (5) выполняется, то задача считается решенной для данных входных данных и на экран выводятся координаты точки D , а также координаты всех остальных. Блок-схема алгоритма приведена на Рис. 7.

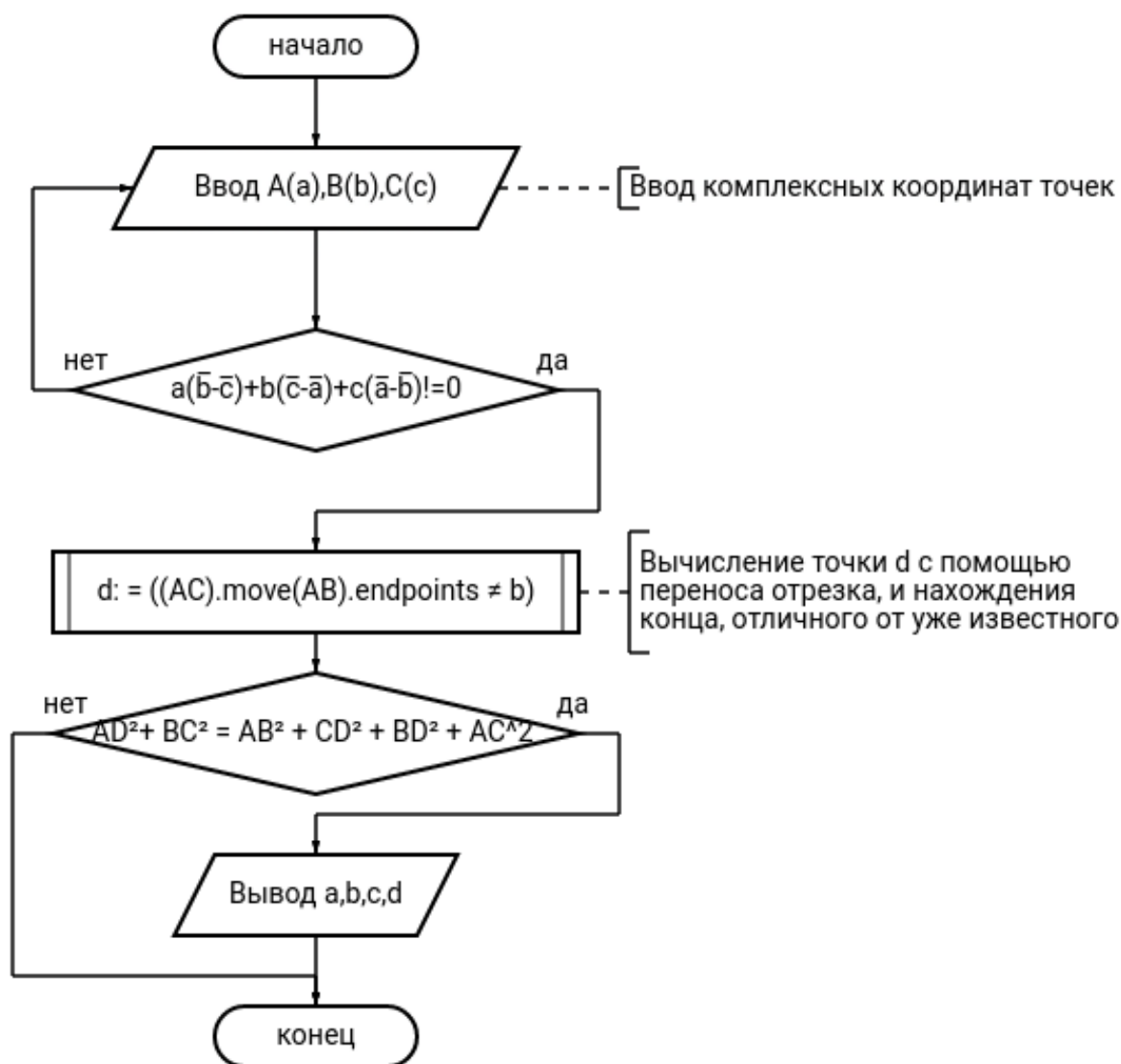


Рис. 7: Блок-схема алгоритма программы

Программная реализация задачи: Решение задачи написано на языке C++ в виде части программы для решения задач из данной работы. Реализация алгоритма программы предоставлена в функции `task3::solve` (файл `task3.cpp`):

```

inline void task3::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision digits after decimal
     * separator.
     */
    const uint8_t comparePrecision = 1;
    const int numbersCount = 4;
    ComplexNumber numbers[numbersCount];

```

```

const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D" };
// clang-format off
// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
               &b = numbers[1],
               &c = numbers[2],
               &d = numbers[3];
// clang-format on
returnCode = 0;
task1::readTriangleFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
    return;
const LineSegment AB { a.toPoint(), b.toPoint() },
                  AC { a.toPoint(), c.toPoint() }, BC { b.toPoint(), c.toPoint() };
const std::pair< Point, Point >& pair = AC.move(AB).getEndpoints();
d = (pair.first == b.toPoint()) ? pair.second : pair.first;
const LineSegment BD { b.toPoint(), d.toPoint() },
                  CD { c.toPoint(), d.toPoint() }, AD { a.toPoint(), d.toPoint() };
// Check 'AD^2 + BC^2 = AB^2 + CD^2 + BD^2 + AC^2'
if (areEqual(power(AD.length(), 2) + power(BC.length(), 2),
              power(AB.length(), 2) + power(CD.length(), 2) +
              power(BD.length(), 2) + power(AC.length(), 2),
              static_cast< int8_t >(comparePrecision))) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << "AD^2 + BC^2 != AB^2 + CD^2 + BD^2 + AC^2.\n";
}

```

Листинг 3: Функция task3::solve

Демонстрация работы:

```

[codetest] ./realease.app 3
Task #3
Enter coordinates of triangle's points:
A: 1 0
B: 5 0
C: 2 3
Computed coordinates:
A: 1 + 0i

```

B: 5 + 0i

C: 2 + 3i

D: 6 + 3i

Задача 4

Постановка задачи: Доказать, что если некоторая прямая пересекает прямые, содержащие стороны BC , CA , AB треугольника ABC , в точках A_1 , B_1 , C_1 соответственно, то середины отрезков AA_1 , BB_1 , CC_1 коллинеарны (Рис. 10).

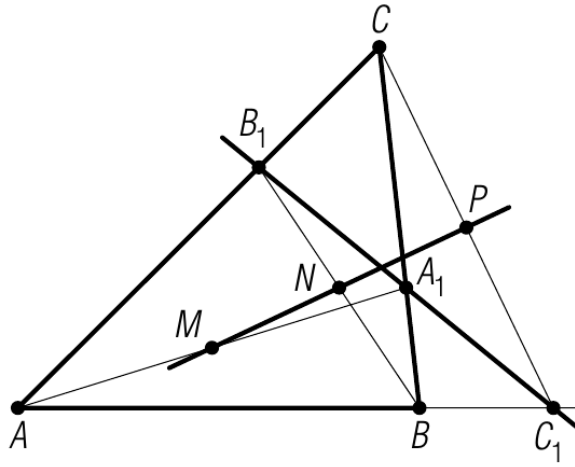


Рис. 8: Иллюстрация к задаче

Решение задачи: Условие коллинеарности троек точек A, B_1, C ; C, A_1, B ; B, C_1, A ; A_1, B_1, C_1 :

$$\begin{cases} a(\bar{b}_1 - \bar{c}) + b_1(\bar{c} - \bar{a}) + c(\bar{a} - \bar{b}_1) = 0 \\ b(\bar{c}_1 - \bar{a}) + c_1(\bar{a} - \bar{b}) + a(\bar{b} - \bar{c}_1) = 0 \\ c(\bar{a}_1 - \bar{b}) + a_1(\bar{b} - \bar{c}) + b(\bar{c} - \bar{a}_1) = 0 \\ a_1(\bar{b}_1 - \bar{a}_1) + b_1(\bar{a}_1 - \bar{a}_1) + a_1(\bar{a}_1 - \bar{b}_1) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Если M, N, P — середины отрезков AA_1, BB_1, CC_1 , то предстоит показать, что

$$m(\bar{n} - \bar{p}) + n(\bar{p} - \bar{m}) + p(\bar{m} - \bar{n}) = 0, \quad (9)$$

Так как $m = \frac{1}{2}(a + a_1)$, $n = \frac{1}{2}(b + b_1)$, $p = \frac{1}{2}(c + c_1)$, то доказываемое равенство (9) эквивалентно такому:

$$(a + a_1)(\bar{b} + \bar{b}_1 - \bar{c} - \bar{c}_1) + (b + b_1)(\bar{c} + \bar{c}_1 - \bar{a} - \bar{a}_1) + (c + c_1)(\bar{a} + \bar{a}_1 - \bar{b} - \bar{b}_1) = 0,$$

или, после перемножения,

$$\begin{aligned} & a(\bar{b}_1 - \bar{c}) + a(\bar{b} - \bar{c}_1) + a_1(\bar{b}_1 - \bar{c}_1) + a_1(\bar{b} - \bar{c}) + b(\bar{c}_1 - \bar{a}) + b(\bar{c} - \bar{a}_1) + \\ & + b_1(\bar{c}_1 - \bar{a}_1) + b_1(\bar{c} - \bar{a}) + c(\bar{a}_1 - \bar{b}) + c(\bar{a} - \bar{b}_1) + c_1(\bar{a}_1 - \bar{b}_1) + c_1(\bar{a} - \bar{b}) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Теперь легко видеть, что (10) получается при почленном сложении равенств (8)

Вычислительная иллюстрация на частном случае: На вход программы передаются координаты свободных точек комплексной плоскости, в данном примере это координаты точек A, B, C, A_1, B_1 . Если A_1, B_1 лежат на треугольнике, то по данным входным данным строится прямая, соответствующая условиям задачи. Далее производится проверка того, что середины отрезков AA_1, BB_1, CC_1 коллинеарны. Если условие выполняется, то задача считается решенной для данных входных данных и на экран выводятся координаты точек M, N, P , а также координаты всех остальных. Блок-схема алгоритма приведена на Рис. 9.

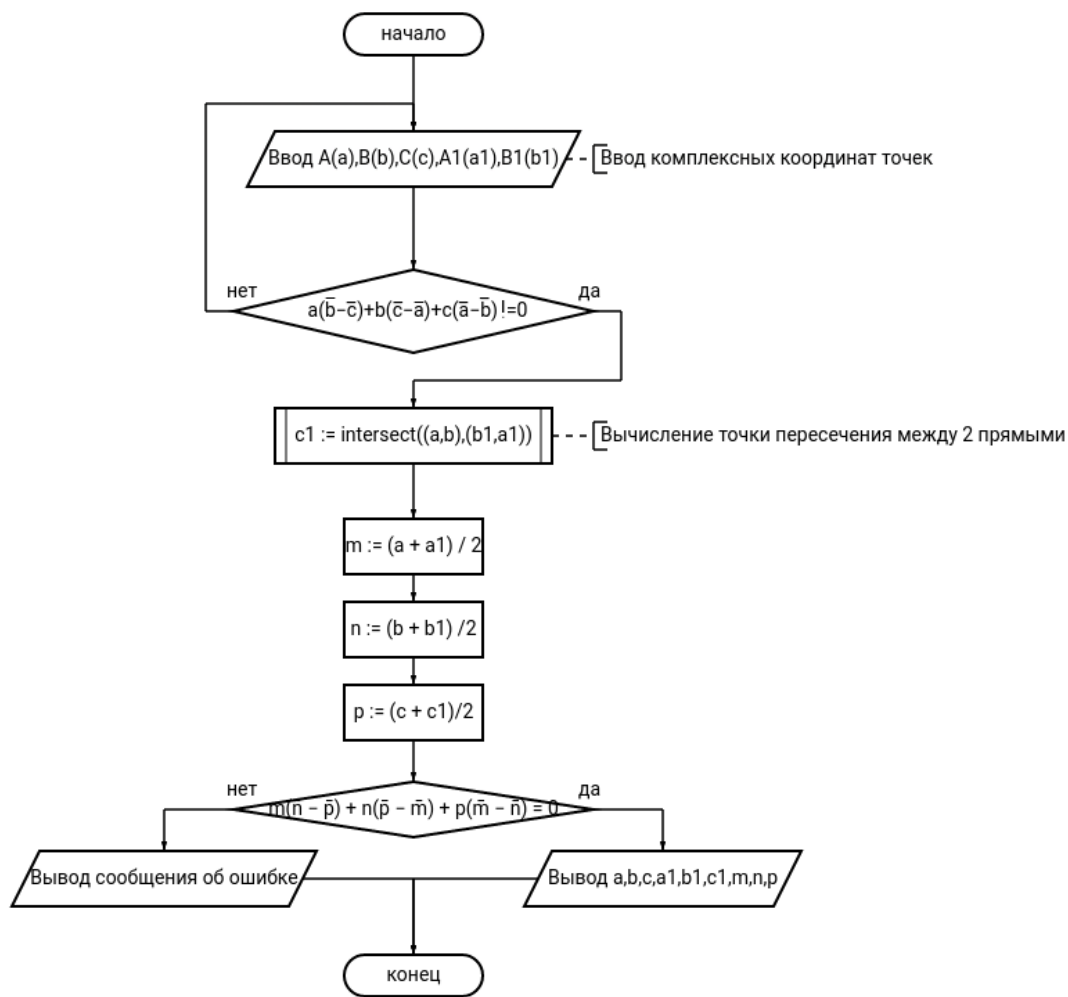


Рис. 9: Блок-схема алгоритма программы

Программная реализация задачи: Решение задачи написано на языке C++ в виде части программы для решения задач из данной работы. Реализация алгоритма программы предоставлена в функции `task4::solve` (файл `task4.cpp`):

```

inline void task4::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    returnCode = 0;
    const int numbersAmount = 9;
    ComplexNumber numbers[numbersAmount];
    const std::string labels[numbersAmount] { "A", "B", "C", "A1", "B1",
                                                "C1", "M", "N", "P" };

    // clang-format off
    // References for readability
    ComplexNumber &a = numbers[0],
                  &b = numbers[1],
                  &c = numbers[2],
  
```

```

        &a1 = numbers[3],
        &b1 = numbers[4],
        &c1 = numbers[5],
        &m = numbers[6],
        &n = numbers[7],
        &p = numbers[8];

// clang-format on
readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
    return;

std::pair< ComplexNumber, ComplexNumber > pairs[2] { { a, b }, { b1, a1 } };
c1 = intersect(pairs[0], pairs[1]);
m = Point::middle(a.toPoint(), a1.toPoint());
n = Point::middle(b.toPoint(), b1.toPoint());
p = Point::middle(c.toPoint(), c1.toPoint());
if (Line::isOnSameLine(m, n, p)) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersAmount);
} else
    std::cerr
        << "The computed points M,N,P is not belong to the same line.\n";
}

```

Листинг 4: Функция task4::solve

Демонстрация работы:

```

[codetest] ./realease.app 4
Task #4
Enter coordinates of a,b,c,a1,b1 points:
A: 0 0
B: 10 0
C: 8 10
A1: 9.5 2.5
B1: 4 5
Computed coordinates:
A: 0 + 0i
B: 10 + 0i
C: 8 + 10i
A1: 9.5 + 2.5i
B1: 4 + 5i

```

C1: 15 + 0i
M: 4.75 + 1.25i
N: 7 + 2.5i
P: 11.5 + 5i

Задача 5

Постановка задачи: Докажите, что диагонали вписанного в окружность четырёхугольника перпендикулярны, тогда и только тогда, когда сумма квадратов его противоположных сторон равна квадрату диаметра описанной окружности (Рис. 10). Таким образом, требуется доказать, что

$$AB^2 + CD^2 = AC^2 + BD^2 = PB^2 \Rightarrow AD \perp CB \quad (11)$$

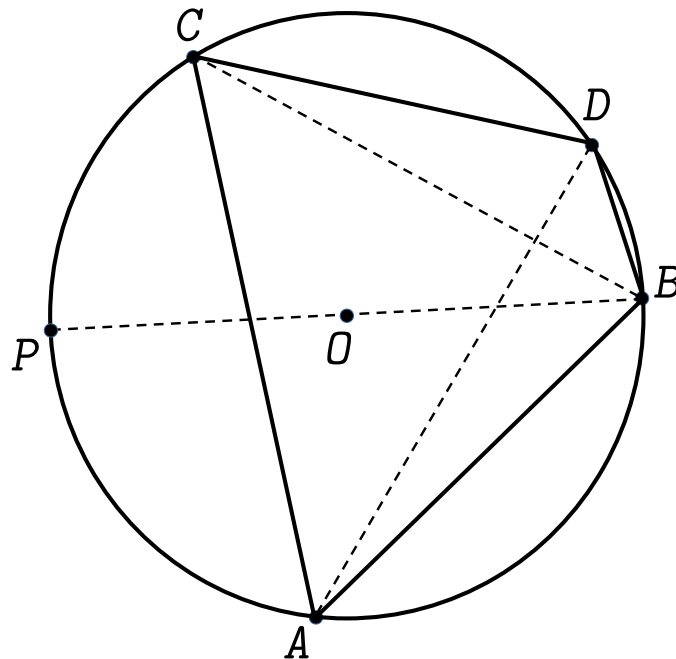


Рис. 10: Иллюстрация к задаче

Решение задачи: Обозначим диаметр окружности как PB ; будем считать, что окружность единичная с центром в т. O .

Исходя из свойств комплексных чисел, верно следующее:

$$AD \perp CB \Leftrightarrow (d - a)(\bar{b} - \bar{c}) + (\bar{d} - \bar{a})(b - c) = 0$$

Из условий задачи:

$$\begin{cases} (a - b)(\bar{a} - \bar{b}) + (c - d)(\bar{c} - \bar{d}) = (p - b)(\bar{p} - \bar{b}) \\ (a - c)(\bar{a} - \bar{c}) + (b - d)(\bar{b} - \bar{d}) = (p - b)(\bar{p} - \bar{b}) \end{cases} \quad (12)$$

Почленно вычтя второе уравнение системы (12) из первого, получаем:

$$\begin{aligned} a\bar{a} - a\bar{b} - b\bar{a} + b\bar{b} + c\bar{c} - c\bar{d} - d\bar{c} + d\bar{d} - a\bar{a} + a\bar{c} + c\bar{a} - c\bar{c} - b\bar{b} + b\bar{d} + \\ + d\bar{b} - d\bar{d} = 0 \Leftrightarrow -a\bar{b} - b\bar{a} - c\bar{d} - d\bar{c} + a\bar{c} + c\bar{a} + b\bar{d} + d\bar{b} = 0 \Leftrightarrow \\ (d - a)(\bar{b} - \bar{c}) + (\bar{d} - \bar{a})(b - c) = 0 \Leftrightarrow AD \perp CB \end{aligned}$$

Таким образом, утверждение (11) доказано.

Вычислительная иллюстрация на частном случае: На вход программы передаются координаты свободных точек комплексной плоскости, в данном примере это координаты точек A, B, C, D , по ним строится окружность. Если условие (11) выполняется (вместо PB используется конструкция $2OB$), то задача считается решенной для данных входных данных и на экран выводятся координаты точки O , а также координаты всех остальных. Блок-схема алгоритма приведена на Рис. 11.

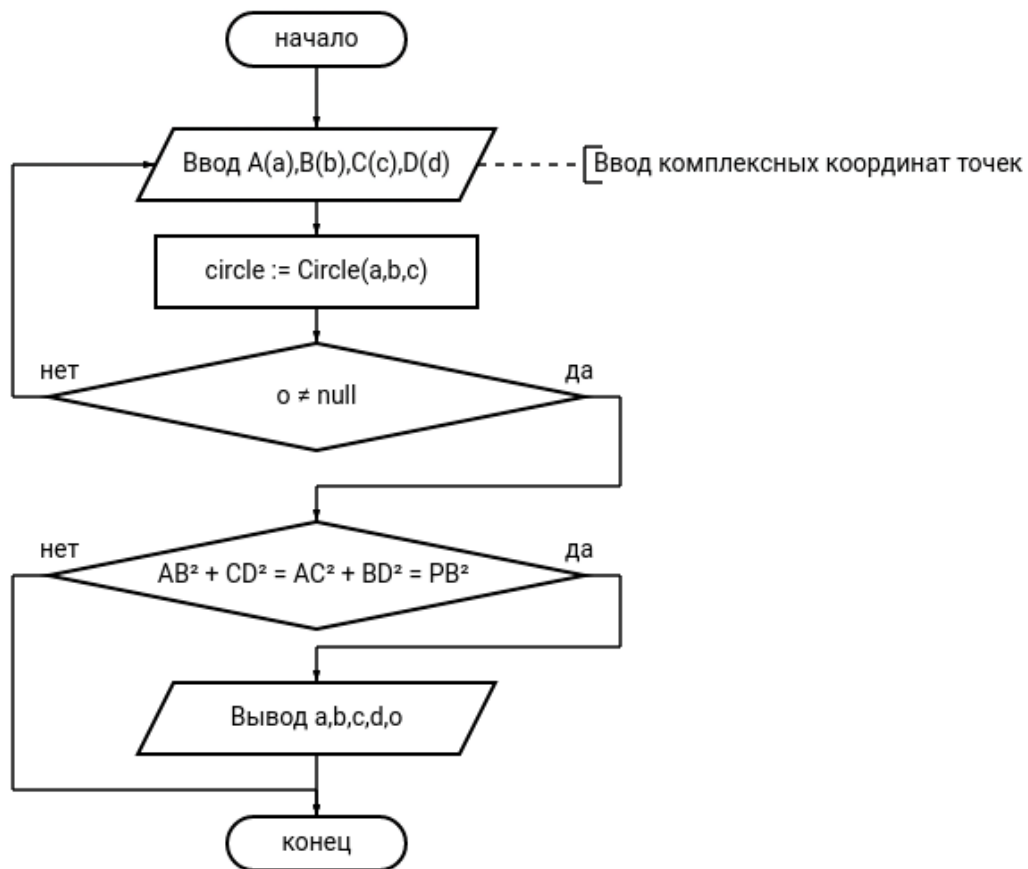


Рис. 11: Блок-схема алгоритма программы

Программная реализация задачи: Решение задачи написано на языке C++ в виде части программы для решения задач из данной работы. Реализация алгоритма программы предоставлена в функции `task5::solve` (файл `task5.cpp`):

```

#include "functions.hpp"
#include "tfunctions.hpp"
inline void task5::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision
     */
    const double comparePrecision = 0.1;
    const int numbersCount = 5;
    const ComplexNumber half(1.0 / 2.0, 1.0 / 2.0);
    LineSegment P1P2, T1T2;
    ComplexNumber numbers[numbersCount];
    const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D", "O" };
    // clang-format off

```

```

// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
               &b = numbers[1],
               &c = numbers[2],
               &d = numbers[3],
               &o = numbers[4];

// clang-format on
readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
const Line AD(a, d), BC(b, c);
Circle circle(a.toPoint(), b.toPoint(), c.toPoint());
o = circle.center();
/**
 * @brief  $AB^2 + CD^2$ 
 */
double first = power(LineSegment(a.toPoint(), b.toPoint()).length(), 2) +
               power(LineSegment(c.toPoint(), d.toPoint()).length(), 2);
/**
 * @brief  $AC^2 + BD^2$ 
 */
double second = power(LineSegment(a.toPoint(), c.toPoint()).length(), 2) +
                power(LineSegment(b.toPoint(), d.toPoint()).length(), 2);
/**
 * @brief  $(2OB)^2$ 
 */
double third = power(2 * LineSegment(o.toPoint(), b.toPoint()).length(), 2);
// Check  $AB^2 + CD^2 = AC^2 + BD^2 = (2OB)^2$ 
if (areEqual(first, second, comparePrecision) &&
    areEqual(second, third, comparePrecision)) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << "AD is not perpendicular to CB\n";
}

```

Листинг 5: Функция task5::solve

Демонстрация работы:

```
[codetest] ./release.app 5
```

```
Task #5
```

```
Enter coordinates of a,b,c,d points (must be points of quadrilateral):
```

```

A: 0 -1
B: 2 -1
C: 0 1
D: 2 1
Computed coordinates:
A: 0 + -1i
B: 2 + -1i
C: 0 + 1i
D: 2 + 1i
O: 1 + 0i
-----

```

Задача 6

Постановка задачи: Докажите, что если средние линии четырёхугольника равны, то его диагонали перпендикулярны, и обратно (Рис. 12).

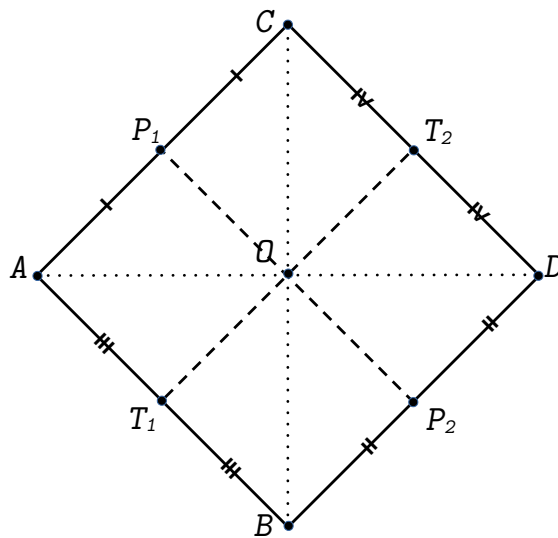


Рис. 12: Иллюстрация к задаче

Решение задачи: Точка O — точка пересечения диагоналей четырёхугольника. Концы средних линий четырёхугольника имеют следующие координаты:

$$\frac{1}{2}(c + d), \frac{1}{2}(a + b), \frac{1}{2}(a + c), \frac{1}{2}(b + d). \quad (13)$$

Если средние линии четырёхугольника равны, то на основании (13) и свойств комплексных чисел, при $AD \neq 0, CB \neq 0$, получаем следующее:

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{2}(c+d) - \frac{1}{2}(a+b) \right| &= \left| \frac{1}{2}(a+c) - \frac{1}{2}(b+d) \right| \Leftrightarrow \left(\frac{1}{2}(c+d) - \frac{1}{2}(a+b) \right) \cdot \\ &\left(\frac{1}{2}(\bar{c} + \bar{d}) - \frac{1}{2}(\bar{a} + \bar{b}) \right) = \left(\frac{1}{2}(a+c) - \frac{1}{2}(b+d) \right) \cdot \left(\frac{1}{2}(\bar{a} + \bar{c}) - \frac{1}{2}(\bar{b} + \bar{d}) \right) \Leftrightarrow \\ \frac{1}{2}((c+d) - (a+b)) \cdot \frac{1}{2}((\bar{c} + \bar{d}) - (\bar{a} + \bar{b})) &= \frac{1}{2}((a+c) - (b+d)) \cdot \frac{1}{2}((\bar{a} + \bar{c}) - \\ &(\bar{b} + \bar{d})) \Leftrightarrow \\ (c+d-a-b) \cdot (\bar{c} + \bar{d} - \bar{a} - \bar{b}) &= (a+c-b-d) \cdot (\bar{a} + \bar{c} - \bar{b} - \bar{d}) \Leftrightarrow \\ a\bar{c} - a\bar{b} + c\bar{a} - c\bar{d} - b\bar{a} + b\bar{d} - d\bar{c} + d\bar{b} &= -a\bar{c} + a\bar{b} - c\bar{a} + c\bar{d} + b\bar{a} - b\bar{d} + d\bar{c} - d\bar{b} \Leftrightarrow \\ a\bar{c} - a\bar{b} + c\bar{a} - c\bar{d} - b\bar{a} + b\bar{d} - d\bar{c} + d\bar{b} &= 0 \Leftrightarrow \\ (a-d)(\bar{c} - \bar{b}) + (c-b)(\bar{a} - \bar{d}) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(\bar{b} + \bar{d}) \Leftrightarrow \\ &(c+d-a-b) \cdot (\bar{c} + \bar{d} - \bar{a} - \bar{b}) = (a+c-b-d) \cdot (\bar{a} + \bar{c} - \bar{b} - \bar{d}) \Leftrightarrow \\ &a\bar{c} - a\bar{b} + c\bar{a} - c\bar{d} - b\bar{a} + b\bar{d} - d\bar{c} + d\bar{b} = -a\bar{c} + a\bar{b} - c\bar{a} + c\bar{d} + b\bar{a} - b\bar{d} + d\bar{c} - d\bar{b} \Leftrightarrow \\ &a\bar{c} - a\bar{b} + c\bar{a} - c\bar{d} - b\bar{a} + b\bar{d} - d\bar{c} + d\bar{b} = 0 \Leftrightarrow \\ &(a-d)(\bar{c} - \bar{b}) + (c-b)(\bar{a} - \bar{d}) = 0 \end{aligned}$$

Тогда $2\overrightarrow{AD}\overrightarrow{CB} = 0 \Leftrightarrow |AD| |CB| \cos \angle COD \Leftrightarrow \angle COD = 90^\circ$, что и требовалось доказать.

Если диагонали четырёхугольника перпендикулярны, то $\angle COD = 90^\circ \Leftrightarrow |AD| |CB| \cos \angle COD = 0 \Leftrightarrow \overrightarrow{AD}\overrightarrow{CB} = 0 \dots$ Дальнейшие рассуждения выполняются в порядке, обратном доказательству в случае, когда средние линии четырёхугольника равны.

Таким образом, если средние линии четырёхугольника равны, то его диагонали перпендикулярны и наоборот.

Вычислительная иллюстрация на частном случае: На вход программы передаются координаты свободных точек комплексной плоскости, в данном примере это координаты вершин четырёхугольника A, B, C, D (выпуклого). Если средние линии четырёхугольника равны и его диагонали перпендикулярны, то задача считается решенной для данных входных данных и на экран выводятся координаты концов средних линий четырёхугольника, а также координаты всех остальных точек. Блок-схема алгоритма приведена на Рис. 13.

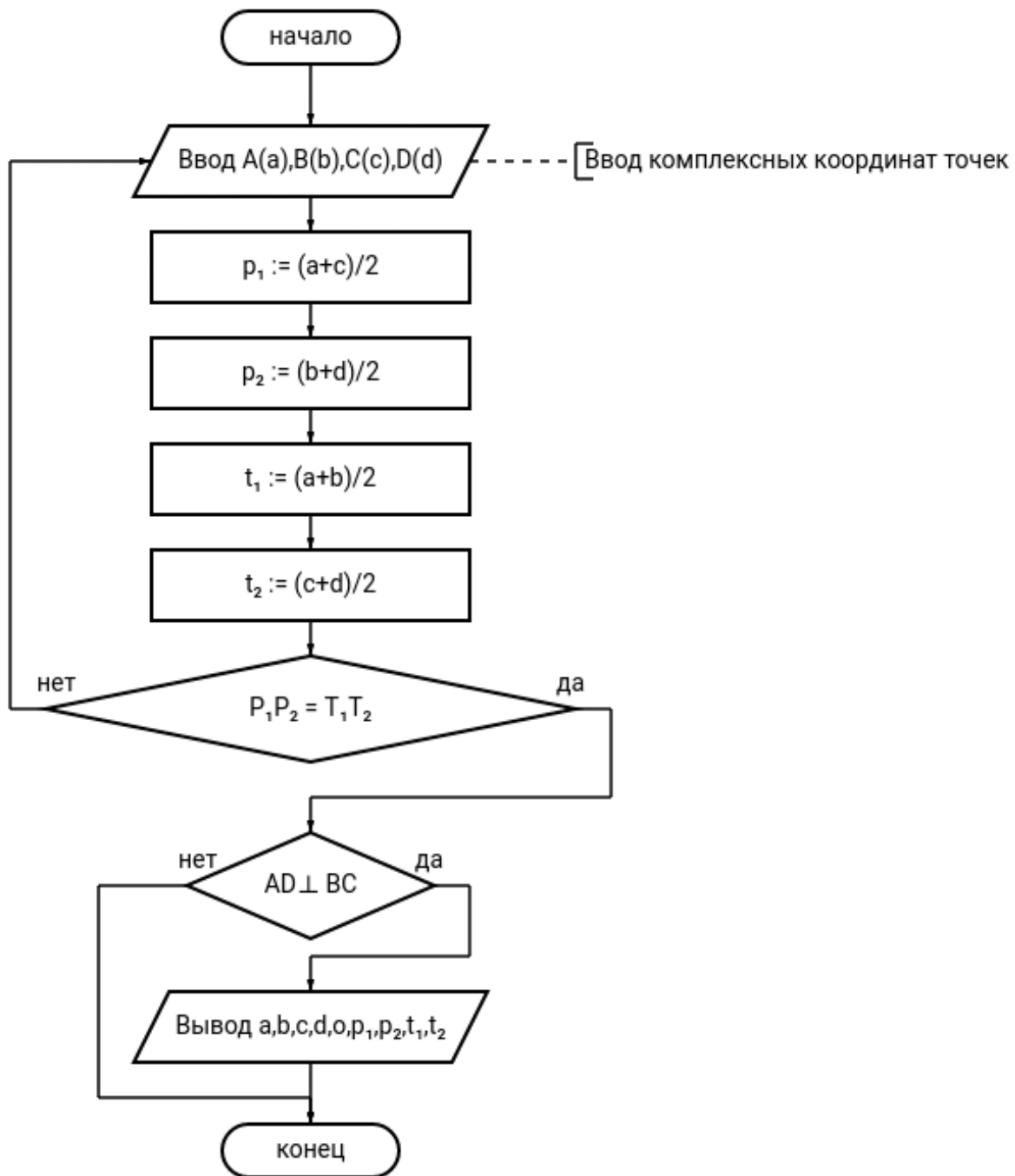


Рис. 13: Блок-схема алгоритма программы

Программная реализация задачи: Решение задачи написано на языке C++ в виде части программы для решения задач из данной работы. Реализация алгоритма программы предоставлена в функции `task6::solve` (файл `task6.cpp`):

```

inline void task6::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision
  
```

```

*/
const double comparePrecision = 0.1;
const int numbersCount = 9;
const ComplexNumber half(1.0 / 2.0, 1.0 / 2.0);
LineSegment P1P2, T1T2;
ComplexNumber numbers[numbersCount];
const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D", "O",
                                           "P1", "P2", "T1", "T2" };

// clang-format off
// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
              &b = numbers[1],
              &c = numbers[2],
              &d = numbers[3],
              &o = numbers[4],
              &p_1 = numbers[5],
              &p_2 = numbers[6],
              &t_1 = numbers[7],
              &t_2 = numbers[8];

// clang-format on
do {
    try {
        readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
        Quadrilateral tmp(a.toPoint(), b.toPoint(), c.toPoint(), d.toPoint());
    } catch (const std::invalid_argument&) {
        std::cerr
            << "Cannot construct quadrilateral by a,b,c,d. You should enter valid
                points.\n";
        continue;
    }
    t_1 = (a + b) * half, t_2 = (c + d) * half;
    T1T2 = LineSegment(t_1.toPoint(), t_2.toPoint());
    p_1 = (a + c) * half, p_2 = (b + d) * half;
    P1P2 = LineSegment(p_1.toPoint(), p_2.toPoint());
} while (!areEqual(P1P2.length(), T1T2.length(), comparePrecision));
const Line AD(a, d), BC(b, c);
o = Line::intersect(AD, BC);
// Check AD is perpendicular to BC
if (AD.isPerpendicular(BC, comparePrecision)) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
}

```

```

} else
    std::cerr << "AD is not perpendicular to BC\n";
}

```

Листинг 6: Функция task6::solve

Демонстрация работы:

```

[codetest] ./realease.app 6
Task #6
Enter coordinates of a,b,c,d points (must be points of quadrilateral):
A: 1 0
B: 3 0
C: 1 2
D: 3 2
Computed coordinates:
A: 1 + 0i
B: 3 + 0i
C: 1 + 2i
D: 3 + 2i
O: 2 + 1i
P1: 1 + 1i
P2: 3 + 1i
T1: 2 + 0i
T2: 2 + 2i
-----

```


Заключение

В ходе выполнения работы изложены основы метода комплексных чисел, было проиллюстрировано его применение при решении 6 задач. Каждая задача имеет вычислительную иллюстрацию, реализованную в виде части программы на C++. Сама программа как целое — консольное приложение, поддерживающая следующие функции: множественный выбор заданий, вывод текста в разном формате (в режиме отладки для считывания данных сторонними приложениями, а также в человеко-читаемом).

Метод имеет большие перспективы для применения в области решения геометрических задач, особенно тех, в которых широко применяются единичные окружности, потому как в алгебре комплексных чисел геометрические объекты, лежащие или принадлежащие таким окружностям выражаются более простыми уравнениями, чем их канонические действительнoзначные аналоги.

Таким образом, все поставленные задачи были успешно выполнены, цель достигнута.

Список литературы

- [1] Понарин Я.П. Алгебра комплексных чисел в геометрических задачах: Книга для учащихся математических классов школ, учителей и студентов педагогических вузов. – М.: МЦНМО, 2004. – 160 с.
- [2] Такеути Г. Теория доказательств. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
- [3] Слойер К. Математические фантазии. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 184 с.
- [4] Коснёвски Ч. Занимательная математика и персональный компьютер. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 192 с.
- [5] Кибирев В. В. Обучение методам решения геометрических задач // Вестник БГУ. 2014. №15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-metodam-resheniya-geometricheskih-zadach> (дата обращения: 19.07.2022).
- [6] Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
- [7] Арнольд В. И. Геометрия комплексных чисел, кватернионов и спинов. – 4-е изд., стереотипное. – М.: МЦНМО, 2014. – 40 с.
- [8] Яглом И. М., Семендяев К. А. Комплексные числа и их применения в геометрии. – 2-е изд., стереотипное. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 192 с.
- [9] Жмурова И. Ю. Изучение комплексных чисел в общеобразовательной школе / И. Ю. Жмурова, С. В. Барина. // Молодой ученый. – 2020. – № 5 (295). – С. 312-314. – URL: <https://moluch.ru/archive/295/67123/> (дата обращения: 17.05.2022).

Приложения

Приложение А. Листинг программы

Файл меню main.cpp:

```
#include "ComplexNumber.hpp"
#include "tfunctions.hpp"
#include "task1.cpp"
#include "task2.cpp"
#include "task3.cpp"
#include "task4.cpp"
#include "task5.cpp"
#include "task6.cpp"
#include <cstring>
#include <iostream>
const char* taskMessageBegin = "Task #";
const char* taskMessageEnd = "\n-----\n";
void printTaskBegin(const ProgramOptions& options, int choice)
{
    const std::string message = taskMessageBegin + std::to_string(choice) + '\n';
    printMessage(options, message.c_str());
}
void printTaskEnd(const ProgramOptions& options)
{
    printMessage(options, taskMessageEnd);
}
int main(int argc, char const* argv[])
{
    int parameters = argc;
    ProgramOptions options;
    bool useStdinToInit = false;
    if (parameters == 1) {
        printMessage(options, "Enter program number to launch: ");
        parameters = 2;
    }
```

```

    useStdinToInit = true;
}
for (int i = 1; i < parameters; i++) {
    int choice, returnCode = 0;
    if (useStdinToInit) {
        std::cin >> choice;
        std::cin.ignore();
    } else {
        if (strcmp(argv[i], "-d") == 0) {
            options.outputStyle = ProgramOptions::sDEBUG;
            continue;
        }
        choice = std::stoi(argv[i]);
    }
    try {
        switch (choice) {
            case 1:
                printTaskBegin(options, choice);
                task1::solve(returnCode, options);
                printTaskEnd(options);
                break;
            case 2:
                printTaskBegin(options, choice);
                task2::solve(returnCode, options);
                printTaskEnd(options);
                break;
            case 3:
                printTaskBegin(options, choice);
                task3::solve(returnCode, options);
                printTaskEnd(options);
                break;
            case 4:
                printTaskBegin(options, choice);
                task4::solve(returnCode, options);
                printTaskEnd(options);
                break;
            case 5:
                printTaskBegin(options, choice);
                task5::solve(returnCode, options);
                printTaskEnd(options);
                break;

```

```

        case 6:
            printTaskBegin(options, choice);
            task6::solve(returnCode, options);
            printTaskEnd(options);
            break;
        default:
            std::cerr << "Entered program number is incorrect, retry.\n";
            break;
    }
} catch (const std::exception& e) {
    std::cerr << e.what() << '\n';
    returnCode = EXIT_FAILURE;
}
if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
    return returnCode;
}
}

```

task1.cpp:

```

#include "tfunctions.hpp"
#include "Circle.hpp"
#include "ComplexNumber.hpp"
#include "LineSegment.hpp"
#include "functions.hpp"
/**
 * @brief Function that solve task #1.
 *
 * @param returnCode number, which represents a error status. 0 - no error
 * occurred, 1 - otherwise.
 * @param options struct, which represents options. Usually useful for setting
 * the output format.
 */
inline void task1::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Numbers should differs lesser than comparePrecision
     */
    const double comparePrecision = 0.1;
    /**
     * @brief Amount digits after decimal separator
     */

```

```

const int8_t roundPrecision = 2;
returnCode = 0;
/**
 * @brief The amount of numbers.
 */
const int numbersCount = 5;
/**
 * @brief Random constant values. They need for get x() or y() values of
 * lines kind of 'y = const' or 'x = const'
 */
const int &randX = numbersCount, &randY = numbersCount;
ComplexNumber numbers[numbersCount];
const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D", "O" };
// clang-format off
// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
               &b = numbers[1],
               &c = numbers[2],
               &d = numbers[3],
               &o = numbers[4];
// clang-format on
/**
 * @brief Reading points from user. This function assign values to numbers
 * array.
 */
readTriangleFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
    return;
Circle circle { a.toPoint(), b.toPoint(), c.toPoint() };
o = ComplexNumber::round({ circle.center() }, roundPrecision);
const Line AB { a, b };
const Line p = Line::makePerpendicular(AB, o.toPoint());
const Point i = Line::intersect(AB, p);
/**
 * @brief Calculating d (it depends line type of p)
 */
switch (p.getType()) {
    case LineType::CONST_X:
        d = Point { p.x(randY), -o.toPoint().Y() + 2 * i.Y() };
        break;
    case LineType::CONST_Y:

```

```

        d = Point { -o.toPoint().X() + 2 * i.X(), p.y(randX) };
        break;
    case LineType::NORMAL:
        d =
            Point { -o.toPoint().X() + 2 * i.X(), -o.toPoint().Y() + 2 * i.Y() };
        break;
}
d = ComplexNumber::round(d, roundPrecision);
const LineSegment sCD { c.toPoint(), d.toPoint() },
    sAC { a.toPoint(), c.toPoint() }, sBC { b.toPoint(), c.toPoint() },
    sAB { a.toPoint(), b.toPoint() };
// Check 'CD^2 = R^2 + AC^2 + BC^2 - AB^2'
const double lhs = power(sCD.length(), 2);
const double rhs = power(circle.radius(), 2) + power(sAC.length(), 2) +
    power(sBC.length(), 2) - power(sAB.length(), 2);
if (areEqual(lhs, rhs, comparePrecision)) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << "CD^2 != R^2 + AC^2 + BC^2 - AB^2.\n";
}

```

task2.cpp:

```

#include "Circle.hpp"
#include "CircleArc.hpp"
#include "ComplexNumber.hpp"
#include "LineSegment.hpp"
#include "functions.hpp"
#include "tfunctions.hpp"
inline void task2::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision digits after decimal
     * separator.
     */
    const uint8_t comparePrecision = 1;
    const int numbersCount = 5;
    const uint32_t circleRadius = 1;
    const bool useApproximation = true;
    ComplexNumber numbers[numbersCount];
    const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "N", "T", "M" };
}

```

```

// clang-format off
// References for readability
ComplexNumber &a = numbers[0],
               &b = numbers[1],
               &n = numbers[2],
               &t = numbers[3],
               &m = numbers[4];

// clang-format on
const Circle circle { Point::zero(), circleRadius };
/**
 * @brief Read the numbers until points not belongs to the circle.
 */
returnCode = 0;
do {
    readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
    if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
        return;
} while (!circle.isBelongs(a.toPoint(), comparePrecision) ||
        !circle.isBelongs(b.toPoint(), comparePrecision) ||
        !circle.isBelongs(n.toPoint(), comparePrecision));
m =
    CircleArc(circle, a.toPoint(), b.toPoint(), t.toPoint(), useApproximation)
        .middle();
const LineSegment AM { a.toPoint(), m.toPoint() },
    MN { m.toPoint(), n.toPoint() }, AN { a.toPoint(), n.toPoint() },
    BN { b.toPoint(), n.toPoint() };
// Check ' $|AM^2 - MN^2| = AN * BN$ '
if (areEqual(std::abs(power(AM.length(), 2) - power(MN.length(), 2)),
    AN.length() * BN.length(),
    static_cast< int8_t >(comparePrecision))) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << " $|AM^2 - MN^2| \neq AN * BN$ .\n";
}

```

task3.cpp:

```

#include "LineSegment.hpp"
#include "functions.hpp"
#include "tfunctions.hpp"
inline void task3::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)

```



```

{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision digits after decimal
     * separator.
     */
    const uint8_t comparePrecision = 1;
    const int numbersCount = 4;
    ComplexNumber numbers[numbersCount];
    const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D" };
    // clang-format off
    // References for readability
    ComplexNumber &a = numbers[0],
                  &b = numbers[1],
                  &c = numbers[2],
                  &d = numbers[3];

    // clang-format on
    returnCode = 0;
    task1::readTriangleFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
    if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
        return;
    const LineSegment AB { a.toPoint(), b.toPoint() },
        AC { a.toPoint(), c.toPoint() }, BC { b.toPoint(), c.toPoint() };
    const std::pair< Point, Point >& pair = AC.move(AB).getEndpoints();
    d = (pair.first == b.toPoint()) ? pair.second : pair.first;
    const LineSegment BD { b.toPoint(), d.toPoint() },
        CD { c.toPoint(), d.toPoint() }, AD { a.toPoint(), d.toPoint() };
    // Check 'AD^2 + BC^2 = AB^2 + CD^2 + BD^2 + AC^2'
    if (areEqual(power(AD.length(), 2) + power(BC.length(), 2),
        power(AB.length(), 2) + power(CD.length(), 2) +
        power(BD.length(), 2) + power(AC.length(), 2),
        static_cast< int8_t >(comparePrecision))) {
        printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
        printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
    } else
        std::cerr << "AD^2 + BC^2 != AB^2 + CD^2 + BD^2 + AC^2.\n";
}

```

task4.cpp:

```

#include "ComplexNumber.hpp"
#include "Line.hpp"
#include "tfunctions.hpp"

```

```

inline void task4::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    returnCode = 0;
    const int numbersAmount = 9;
    ComplexNumber numbers[numbersAmount];
    const std::string labels[numbersAmount] { "A", "B", "C", "A1", "B1",
                                              "C1", "M", "N", "P" };

    // clang-format off
    // References for readability
    ComplexNumber &a = numbers[0],
                  &b = numbers[1],
                  &c = numbers[2],
                  &a1 = numbers[3],
                  &b1 = numbers[4],
                  &c1 = numbers[5],
                  &m = numbers[6],
                  &n = numbers[7],
                  &p = numbers[8];

    // clang-format on
    readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
    if (returnCode != EXIT_SUCCESS)
        return;

    std::pair< ComplexNumber, ComplexNumber > pairs[2] { { a, b }, { b1, a1 } };
    c1 = intersect(pairs[0], pairs[1]);
    m = Point::middle(a.toPoint(), a1.toPoint());
    n = Point::middle(b.toPoint(), b1.toPoint());
    p = Point::middle(c.toPoint(), c1.toPoint());
    if (Line::isOnSameLine(m, n, p)) {
        printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
        printNumbers(options, numbers, labels, numbersAmount);
    } else
        std::cerr
            << "The computed points M,N,P is not belong to the same line.\n";
}

```

task5.cpp:

```

#include "Circle.hpp"
#include "ComplexNumber.hpp"
#include "LineSegment.hpp"
#include "Quadrilateral.hpp"
#include "functions.hpp"

```

```

#include "tfunctions.hpp"
inline void task5::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision
     */
    const double comparePrecision = 0.1;
    const int numbersCount = 5;
    const ComplexNumber half(1.0 / 2.0, 1.0 / 2.0);
    LineSegment P1P2, T1T2;
    ComplexNumber numbers[numbersCount];
    const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D", "O" };
    // clang-format off
    // References for readability
    ComplexNumber &a = numbers[0],
                  &b = numbers[1],
                  &c = numbers[2],
                  &d = numbers[3],
                  &o = numbers[4];
    // clang-format on
    readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
    const Line AD(a, d), BC(b, c);
    Circle circle(a.toPoint(), b.toPoint(), c.toPoint());
    o = circle.center();
    /**
     * @brief  $AB^2 + CD^2$ 
     */
    double first = power(LineSegment(a.toPoint(), b.toPoint()).length(), 2) +
                  power(LineSegment(c.toPoint(), d.toPoint()).length(), 2);
    /**
     * @brief  $AC^2 + BD^2$ 
     */
    double second = power(LineSegment(a.toPoint(), c.toPoint()).length(), 2) +
                   power(LineSegment(b.toPoint(), d.toPoint()).length(), 2);
    /**
     * @brief  $(2OB)^2$ 
     */
    double third = power(2 * LineSegment(o.toPoint(), b.toPoint()).length(), 2);
    // Check  $AB^2 + CD^2 = AC^2 + BD^2 = (2OB)^2$ 
    if (areEqual(first, second, comparePrecision) &&
        areEqual(second, third, comparePrecision)) {

```

```

    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << "AD is not perpendicular to CB\n";
}

```

task6.cpp:

```

#include "ComplexNumber.hpp"
#include "LineSegment.hpp"
#include "Quadrilateral.hpp"
#include "functions.hpp"
#include "tfunctions.hpp"
inline void task6::solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options)
{
    /**
     * @brief Compare with precision up to comparePrecision
     */
    const double comparePrecision = 0.1;
    const int numbersCount = 9;
    const ComplexNumber half(1.0 / 2.0, 1.0 / 2.0);
    LineSegment P1P2, T1T2;
    ComplexNumber numbers[numbersCount];
    const std::string labels[numbersCount] { "A", "B", "C", "D", "O",
                                              "P1", "P2", "T1", "T2" };

    // clang-format off
    // References for readability
    ComplexNumber &a = numbers[0],
                  &b = numbers[1],
                  &c = numbers[2],
                  &d = numbers[3],
                  &o = numbers[4],
                  &p_1 = numbers[5],
                  &p_2 = numbers[6],
                  &t_1 = numbers[7],
                  &t_2 = numbers[8];

    // clang-format on
    do {
        try {
            readNumbersFromUser(numbers, labels, options, returnCode);
            Quadrilateral tmp(a.toPoint(), b.toPoint(), c.toPoint(), d.toPoint());
        } catch (const std::invalid_argument&) {

```

```

std::cerr
    << "Cannot construct quadrilateral by a,b,c,d. You should enter valid
        points.\n";
    continue;
}
t_1 = (a + b) * half, t_2 = (c + d) * half;
T1T2 = LineSegment(t_1.toPoint(), t_2.toPoint());
p_1 = (a + c) * half, p_2 = (b + d) * half;
P1P2 = LineSegment(p_1.toPoint(), p_2.toPoint());
} while (!areEqual(P1P2.length(), T1T2.length(), comparePrecision));
const Line AD(a, d), BC(b, c);
o = Line::intersect(AD, BC);
// Check AD is perpendicular to BC
if (AD.isPerpendicular(BC, comparePrecision)) {
    printMessage(options, "Computed coordinates:\n");
    printNumbers(options, numbers, labels, numbersCount);
} else
    std::cerr << "AD is not perpendicular to BC\n";
}

```

tffunctions.hpp:

```

/**
 * @file tffunctions.hpp
 * @author Grigory Stupnikov (gs.obr@ya.ru)
 * @brief Namespaces and functions with task implementation code
 * @version 0.1
 * @date 2022-07-14
 *
 * @copyright Copyright © 2022 Grigory Stupnikov. All rights reserved. Licensed
 * under GNU GPLv3. See https://opensource.org/licenses/GPL-3.0.
 */
#ifndef COURSEWORK_4_1_TFUNCTIONS_HPP
#define COURSEWORK_4_1_TFUNCTIONS_HPP
#include "ComplexNumber.hpp"
#include <tuple>
using clineSegment_t = std::pair< ComplexNumber, ComplexNumber >;
struct ProgramOptions
{
    enum OutputStyle
    {

```

```

        sDEBUG, // Plain, no output except result, useful for debug
        sRICH // Plain, print messages to user
    } outputStyle = sRICH;
};

/**
 * @brief Intersect of 2 line segments
 * @return ComplexNumber, intersection point of lines
 */
ComplexNumber intersect(const clineSegment_t& first, clineSegment_t second);
bool isPointBelongsSegment(const clineSegment_t& segment, ComplexNumber point);
/**
 * @brief Print message. It prints only numbers if options.outputStyle == DEBUG.
 * Passing non null-terminated string is UB, don't do this!
 * Supported format specifiers:
 * %N - complex number (ComplexNumber*)
 * %s - string (const char*)
 * @param ... data to print
 */
void printMessage(const ProgramOptions& options, const char* format, ...);
void printNumbers(const ProgramOptions& options, const ComplexNumber numbers[],
                  const std::string labels[], const size_t amount);
namespace task1 {
    void readTriangleFromUser(ComplexNumber arr[3], const std::string labels[3],
                              const ProgramOptions& options, int& returnCode);
    void solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options);
}
namespace task2 {
    void readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[4], const std::string labels[4],
                              const ProgramOptions& options, int& returnCode);
    void solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options);
}
namespace task3 {
    void solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options);
}
namespace task4 {
    void readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[5], const std::string labels[5],
                              const ProgramOptions& options, int& returnCode);
    void solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options);
}
namespace task5 {
    void readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[4], const std::string labels[4],

```

```

        const ProgramOptions& options, int& returnCode);
    void solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options);
}

namespace task6 {
    void readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[4], const std::string labels[4],
        const ProgramOptions& options, int& returnCode);
    void solve(int& returnCode, const ProgramOptions& options);
}

#endif // COURSEWORK_4_1_TFUNCTIONS_HPP

```

tffunctions.cpp:

```

#include "tffunctions.hpp"
#include "Line.hpp"
#include "Quadrilateral.hpp"
#include <cmath>
#include <cstdarg>
#include <cstring>
#include <functions.hpp>
#include <unordered_map>

void printElementRichStyle(const char* specifier, const void* data);
void printElementUnixStyle(const char* specifier, const void* data);
void printElement(const ProgramOptions& options, const char* specifier,
    const void* data);

bool isValidSpecifier(const std::string& specifier);
const void* extractElipsisElement(va_list* elipsis,
    const std::string& specifier);

const size_t specifiersAmount = 2;
enum class ElementType
{
    ComplexNumber,
    String
};

const std::unordered_map< std::string, ElementType > specifiers = {
    { "%N", ElementType::ComplexNumber },
    { "%s", ElementType::String }
};

ComplexNumber intersect(const clineSegment_t& first, clineSegment_t second)
{
    return ComplexNumber { Line::intersect(Line(first.first, first.second),
        Line(second.first, second.second)) };
}

```

```

bool isPointBelongsSegment(const clineSegment_t& segment, ComplexNumber cpoint)
{
    const ComplexNumber &a = segment.first, &b = segment.second;
    Line line(a, b);
    double imMax = std::max(a.Im(), b.Im()), imMin = std::min(a.Im(), b.Im());
    double reMax = std::max(a.Re(), b.Re()), reMin = std::min(a.Re(), b.Re());
    bool isPointInBounds = (imMin <= cpoint.Im() && cpoint.Im() <= imMax) &&
        (reMin <= cpoint.Re() && cpoint.Re() <= reMax);
    return line.isBelongs(static_cast< Point >(cpoint)) && isPointInBounds;
}

void task1::readTriangleFromUser(ComplexNumber arr[3],
                                const std::string labels[3],
                                const ProgramOptions& options, int& returnCode)
{
    const size_t labelsCount = 3;
    // clang-format off
    ComplexNumber &a = arr[0],
                &b = arr[1],
                &c = arr[2];
    // clang-format on
    bool isTriangle = false;
    while (!isTriangle) {
        printMessage(options, "Enter coordinates of triangle's points:\n");
        if (std::cin.fail()) {
            if (std::cin.eof()) {
                std::cerr << "User input was canceled. Aborting...\n";
                return;
            }
            std::cin.ignore();
            std::cin.clear();
        }
        for (size_t i = 0; i < labelsCount; i++) {
            printMessage(options, ( ' ' + labels[i] + ": ").c_str());
            std::cin >> arr[i];
            arr[i] = ComplexNumber::round(arr[i], 2);
        }
        isTriangle = !Line::isOnSameLine(a, b, c);
        if (!isTriangle)
            std::cerr << "Incorrect a,b,c. Must be points of the triangle ABC\n";
    }
}

```



```

void task2::readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[4],
                                const std::string labels[4],
                                const ProgramOptions& options, int& returnCode)
{
    returnCode = 0;
    const size_t labelsCount = 4;
    // clang-format off
    ComplexNumber &a = arr[0],
                  &b = arr[1];
    // clang-format on
    bool isEqual = true;
    while (isEqual) {
        printMessage(
            options,
            "Enter coordinates of a,b,n,t points (must conform  $x^2+y^2 = 1$ , t between a
            and b):\n");
        if (std::cin.fail()) {
            if (std::cin.eof()) {
                std::cerr << "User input was canceled. Aborting...\n";
                returnCode = 1;
                return;
            }
            std::cin.ignore();
            std::cin.clear();
        }
        for (size_t i = 0; i < labelsCount; i++) {
            printMessage(options, (' ' + labels[i] + ": ").c_str());
            std::cin >> arr[i];
            arr[i] = ComplexNumber::round(arr[i], 2);
        }
        isEqual = a == b;
        if (isEqual)
            std::cerr << "Incorrect a,b. Must be not equal\n";
    }
}

void task4::readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[5],
                                const std::string labels[5],
                                const ProgramOptions& options, int& returnCode)
{
    returnCode = 0;
    const size_t labelsCount = 5;

```

```

// clang-format off
ComplexNumber &a = arr[0],
                &b = arr[1],
                &c = arr[2],
                &a1 = arr[3],
                &b1 = arr[4];

// clang-format on
bool isTriangle = false, isValidA1 = false, isValidB1 = false;
while (!(isTriangle && isValidA1 && isValidB1)) {
    printMessage(options, "Enter coordinates of a,b,c,a1,b1 points:\n");
    if (std::cin.fail()) {
        if (std::cin.eof()) {
            std::cerr << "User input was canceled. Aborting...\n";
            returnCode = 1;
            return;
        }
        std::cin.ignore();
        std::cin.clear();
    }
    for (size_t i = 0; i < labelsCount; i++) {
        printMessage(options, (',' + labels[i] + ": ").c_str());
        std::cin >> arr[i];
        arr[i] = ComplexNumber::round(arr[i], 2);
    }
    isTriangle = !Line::isOnSameLine(a, b, c);
    isValidA1 = isPointBelongsSegment({ b, c }, a1);
    isValidB1 = isPointBelongsSegment({ a, c }, b1);
    if (!isTriangle)
        std::cerr << "Incorrect a,b,c. Must be points of the triangle ABC\n";
    if (!isValidA1)
        std::cerr
            << "The a1 is incorrect. Must belong to segment of line BC\n";
    if (!isValidB1)
        std::cerr
            << "The b1 is incorrect. Must belong to segment of line AC\n";
}
}

void task5::readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[4],
                                const std::string labels[4],
                                const ProgramOptions& options, int& returnCode)
{

```

```

returnCode = 0;
const size_t labelsCount = 4;
printMessage(
    options,
    "Enter coordinates of a,b,c,d points (must be points of quadrilateral):\n");
bool validPoints = false;
while (!validPoints) {
    if (std::cin.fail()) {
        if (std::cin.eof()) {
            std::cerr << "User input was canceled. Aborting...\n";
            returnCode = 1;
            return;
        }
        std::cin.ignore();
        std::cin.clear();
    }
    for (size_t i = 0; i < labelsCount; i++) {
        printMessage(options, ( ' ' + labels[i] + ": ").c_str());
        std::cin >> arr[i];
        arr[i] = ComplexNumber::round(arr[i], 2);
    }
    try {
        Quadrilateral tmp(static_cast< Point >(arr[0]),
                           static_cast< Point >(arr[1]),
                           static_cast< Point >(arr[2]),
                           static_cast< Point >(arr[3]));
    } catch (const std::invalid_argument&) {
        std::cerr
            << "Cannot construct quadrilateral by a,b,c,d. You should enter valid
                points.\n";
        continue;
    }
    validPoints = true;
}
}

void task6::readNumbersFromUser(ComplexNumber arr[4],
                                const std::string labels[4],
                                const ProgramOptions& options, int& returnCode)
{
    returnCode = 0;
    const size_t labelsCount = 4;

```

```

printMessage(
    options,
    "Enter coordinates of a,b,c,d points (must be points of quadrilateral):\n");
if (std::cin.fail()) {
    if (std::cin.eof()) {
        std::cerr << "User input was canceled. Aborting...\n";
        returnCode = 1;
        return;
    }
    std::cin.ignore();
    std::cin.clear();
}
for (size_t i = 0; i < labelsCount; i++) {
    printMessage(options, (',' + labels[i] + ": ").c_str());
    std::cin >> arr[i];
    arr[i] = ComplexNumber::round(arr[i], 2);
}
}

void printElementUnixStyle(const ElementType& type, const void* data)
{
    const ComplexNumber* number;
    switch (type) {
        case ElementType::ComplexNumber:
            number = static_cast< const ComplexNumber* >(data);
            if (number) {
                const double re = number->Re(), im = number->Im();
                std::cout
                    << ((std::abs(re) < std::numeric_limits< double >::epsilon())
                        ? 0
                        : re)
                    << ', '
                    << ((std::abs(im) < std::numeric_limits< double >::epsilon())
                        ? 0
                        : im);
            }
            break;
        case ElementType::String:
        default:
            break;
    }
}
}

```

```

void printElementRichStyle(const ElementType& type, const void* data)
{
    const ComplexNumber* number;
    const char* string;
    switch (type) {
        case ElementType::ComplexNumber:
            number = static_cast< const ComplexNumber* >(data);
            if (number)
                std::cout << *number;
            break;
        case ElementType::String:
            string = static_cast< const char* >(data);
            if (string)
                std::cout << string;
        default:
            break;
    }
}

void printElement(const ProgramOptions& options, const ElementType& type,
                 const void* data)
{
    switch (options.outputStyle) {
        case ProgramOptions::sDEBUG:
            printElementUnixStyle(type, data);
            break;
        case ProgramOptions::sRICH:
            printElementRichStyle(type, data);
            break;
        default:
            break;
    }
}

void printChar(const ProgramOptions& options, const char& c)
{
    switch (options.outputStyle) {
        case ProgramOptions::sRICH:
            std::cout << c;
            break;
        default:
            break;
    }
}

```

```

}
bool isValidSpecifier(const std::string& specifier)
{
    if (specifiers.find(specifier) != specifiers.cend())
        return true;
    else
        return false;
}
void printMessage(const ProgramOptions& options, const char* format, ...)
{
    va_list data;
    size_t formatLen = strlen(format);
    const void* element;
    va_start(data, format);
    for (size_t i = 0; i < formatLen; ++i) {
        switch (format[i]) {
            case '%':
                if (i < formatLen - 1) {
                    const std::string specifier(&format[i], 2);
                    if (isValidSpecifier(specifier)) {
                        element = extractElipsisElement(&data, specifier);
                        printElement(options, specifiers.at(specifier), element);
                    }
                    ++i;
                }
                break;
            default:
                printChar(options, format[i]);
                break;
        }
    }
    va_end(data);
}
void printNumbers(const ProgramOptions& options, const ComplexNumber numbers[],
                 const std::string labels[], const size_t amount)
{
    switch (options.outputStyle) {
        case ProgramOptions::sDEBUG:
            for (size_t i = 0; i < amount; i++) {
                printElementUnixStyle(ElementType::ComplexNumber, &numbers[i]);
                if (i < amount - 1)

```

```

        std::cout << ' ';
    }
    break;
case ProgramOptions::sRICH:
    for (size_t i = 0; i < amount; i++) {
        std::cout << " " << labels[i] << ": ";
        printElementRichStyle(ElementType::ComplexNumber, &numbers[i]);
        if (i < amount - 1)
            std::cout << '\n';
    }
    break;
default:
    break;
}
}

const void* extractElipsisElement(va_list* elipsis,
                                   const std::string& specifier)
{
    switch (specifiers.at(specifier)) {
        case ElementType::ComplexNumber:
            return va_arg(*elipsis, ComplexNumber*);
        case ElementType::String:
            return va_arg(*elipsis, const char*);
        default:
            return nullptr;
    }
}

```

ComplexNumber.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_COMPLEXNUMBER_HPP
#define COURSEWORK_4_1_COMPLEXNUMBER_HPP
#include "Point.hpp"
#include <iostream>
// TODO write comments
class ComplexNumber
{
private:
    double _imaginary;
    double _real;
    friend std::ostream& operator<<(std::ostream& out,

```

```

        const ComplexNumber& number);

friend std::istream& operator>>(std::istream& in, ComplexNumber& number);
public:
    ComplexNumber(double real = 0, double imaginary = 0);
    ComplexNumber(const ComplexNumber& source);
    ComplexNumber(const Point& point);
    void operator=(const ComplexNumber& b);
    ComplexNumber operator+(const ComplexNumber& b) const;
    ComplexNumber operator-(const ComplexNumber& b) const;
    ComplexNumber operator*(const ComplexNumber& b) const;
    // ComplexNumber operator/(const ComplexNumber& b) const;
    explicit operator Point() const { return Point(Re(), Im()); }
    Point toPoint() const { return static_cast< Point >(*this); }
    bool operator==(const ComplexNumber& b) const;
    bool operator!=(const ComplexNumber& b) const;
    static ComplexNumber conjugate(const ComplexNumber& number);
    /**
     * @brief Round ComplexNumber to specified digits after decimal separator
     *
     * @param number source number
     * @param ulp amount digits after decimal separator
     * @return ComplexNumber - Rounded number
     */
    static ComplexNumber round(const ComplexNumber& number, int8_t ulp);
    const double& Re() const { return _real; }
    const double& Im() const { return _imaginary; }
    static ComplexNumber zero() { return ComplexNumber(0, 0); }
};
#endif // COURSEWORK_4_1_COMPLEXNUMBER_HPP

```

ComplexNumber.cpp:

```

#include "ComplexNumber.hpp"
#include "Line.hpp"
#include "functions.hpp"
static const ComplexNumber zero = ComplexNumber(0, 0);
ComplexNumber::ComplexNumber(const Point& point)
{
    _real = point.X();
    _imaginary = point.Y();
}
ComplexNumber::ComplexNumber(double real, double imaginary) :

```



```

    _imaginary(imaginary), _real(real)
{
}
ComplexNumber::ComplexNumber(const ComplexNumber& source) :
    _imaginary(source.Im()), _real(source.Re())
{
}
std::ostream& operator<<(std::ostream& out, const ComplexNumber& number)
{
    out << number._real << " + " << number._imaginary << "i";
    return out;
}
std::istream& operator>>(std::istream& in, ComplexNumber& number)
{
    in >> number._real >> number._imaginary;
    return in;
}
void ComplexNumber::operator=(const ComplexNumber& b)
{
    this->_real = b.Re();
    this->_imaginary = b.Im();
    return;
}
ComplexNumber ComplexNumber::operator+(const ComplexNumber& b) const
{
    return ComplexNumber(this->Re() + b.Re(), this->Im() + b.Im());
}
ComplexNumber ComplexNumber::operator-(const ComplexNumber& b) const
{
    return ComplexNumber(this->Re() - b.Re(), this->Im() - b.Im());
}
ComplexNumber ComplexNumber::operator*(const ComplexNumber& b) const
{
    return ComplexNumber(this->Re() * b.Re(), this->Im() * b.Im());
}
bool ComplexNumber::operator==(const ComplexNumber& b) const
{
    return this->Re() == b.Re() && this->Im() == b.Im();
}
bool ComplexNumber::operator!=(const ComplexNumber& b) const
{

```

```

    return !(*this == b);
}
ComplexNumber ComplexNumber::conjugate(const ComplexNumber& number)
{
    return ComplexNumber(number.Re(), -number.Im());
}
ComplexNumber ComplexNumber::round(const ComplexNumber& number, int8_t ulp)
{
    return ComplexNumber(::round(number._real, ulp),
                        ::round(number._imaginary, 2));
}

```

Line.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_LINE_HPP
#define COURSEWORK_4_1_LINE_HPP
#include "ComplexNumber.hpp"
#include "Point.hpp"
#include <tuple>
enum class LineType
{
    CONST_Y, // y = const
    CONST_X, // x = const
    NORMAL  // y = kx + b
};
/**
 * @brief Represents line by equation 'y = kx + b'
 */
class Line
{
private:
    double _k, _b;
    /**
     * @brief Defines y or x constant value if _type is CONST_X or CONST_Y. This
     * is reference for memory optimization.
     */
    double &_x = _b, &_y = _k;
    LineType _type;
    static double getKFromPoints(const Point& a, const Point& b);
    static double getBFromPoints(const Point& a, const Point& b);
    class LineEquation;

```

```

    void finishInit(const LineEquation& initEquation);
public:
    Line(double k = 0, double b = 0);
    Line(const std::pair< Point, Point >& pair);
    Line(const Point& first, const Point& second) :
        Line(std::make_pair(first, second))
    {
    }
    /**
     * @brief Construct a new Line object (algorithm is same as for the two
     * Points)
     */
    Line(const ComplexNumber& first, const ComplexNumber& second);
    Line(const Line& source);
    LineType getType() const { return _type; }
    double y(double x) const;
    double x(double y) const;
    const double& K() const { return _k; }
    const double& B() const { return _b; }
    bool isInX(double x) const;
    bool isInY(double y) const;
    bool isBelongs(Point point) const;
    // bool isCollinear(const Line& other) const;
    bool isPerpendicular(const Line& other, double precision = 0.01) const;
    /**
     * @brief Swap Line @b this with @b other
     */
    void swap(Line& other) { Line::swap(*this, other); };
    void operator=(const Line& other);
    static Line makePerpendicular(const Line& to, const Point& from);
    /**
     * @brief Intersect of 2 line segments
     * @return Point, intersection point of lines, or (Inf;Inf) if lines is
     * collinear
     */
    static Point intersect(const Line& first, const Line& second);
    static bool isOnSameLine(const Point& a, const Point& b, const Point& c);
    static bool isOnSameLine(const ComplexNumber& a, const ComplexNumber& b,
                             const ComplexNumber& c);
    static void swap(Line& left, Line& right);
};

```

```
#endif // COURSEWORK_4_1_LINE_HPP
```

Line.cpp:

```
#include "Line.hpp"
#include "functions.hpp"
#include <cmath>
#include <limits>
#include <stdexcept>
class Line::LineEquation
{
private:
    Point _pointA, _pointB;
    double _k, _b, _x, _y;
    double xDiff, yDiff;
    bool _inited = false;
    LineType type;
    void initByLineType();
public:
    LineEquation() {};
    LineEquation(const Point& a, const Point& b);
    LineEquation(const ComplexNumber& a, const ComplexNumber& b);
    double K() const { return _k; }
    double B() const { return _b; }
    double xConst() const { return _x; }
    double yConst() const { return _y; }
    bool isInited() const { return _inited; }
    LineType getType() const { return type; }
};

Point intersectEqualType(const Line& first, const Line& second);
Point intersectSubNormalType(const Line& first, const Line& second);
#pragma region Constructors
void Line::finishInit(const LineEquation& initedEquation)
{
    if (!initedEquation.isInited())
        throw std::runtime_error(
            "Cannot finish line initialization with not inited equation!");
    _k = initedEquation.K();
    _b = initedEquation.B();
    _type = initedEquation.getType();
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
```

```

        _x = initEquation.xConst();
        break;
    case LineType::CONST_Y:
        _y = initEquation.yConst();
        break;
    default:
        break;
    }
}
Line::Line(double k, double b) : _k(k), _b(b)
{
    if (std::isinf(k)) {
        throw std::runtime_error(
            "Cannot construct line x = ? from equation y = kx + b");
    } else if (k == 0) {
        _type = LineType::CONST_Y;
        _y = b;
    }
}
Line::Line(const std::pair< Point, Point >& pair)
{
    LineEquation equation = LineEquation(pair.first, pair.second);
    finishInit(equation);
}
Line::Line(const ComplexNumber& first, const ComplexNumber& second)
{
    LineEquation equation = LineEquation(first, second);
    finishInit(equation);
}
Line::Line(const Line& source)
{
    *this = source;
}
#pragma endregion
#pragma region Getters and methods
double Line::y(double x) const
{
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
            return (_x == x) ? std::numeric_limits< double >::infinity() : 0;
        case LineType::CONST_Y:

```

```

        return _y;
    case LineType::NORMAL:
        return _k * x + _b;
    default:
        return 0;
    }
}

double Line::x(double y) const
{
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
            return _x;
        case LineType::CONST_Y:
            return (_y == y) ? std::numeric_limits< double >::infinity() : 0;
        case LineType::NORMAL:
            return (y - _b) / _k;
        default:
            return 0;
    }
}

bool Line::isInX(double x) const
{
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
            return _x == x;
        case LineType::CONST_Y:
        case LineType::NORMAL:
            return true;
        default:
            return false;
    }
}

bool Line::isInY(double y) const
{
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
        case LineType::CONST_Y:
            return _y == y;
        case LineType::NORMAL:
            return true;
        default:

```

```

        return false;
    }
}
bool Line::isBelongs(Point point) const
{
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
            return _x == point.X();
        case LineType::CONST_Y:
            return _y == point.Y();
        case LineType::NORMAL:
            return almost_equal(y(point.X()), point.Y(), 2);
        default:
            return false;
    }
}
#pragma endregion
void Line::operator=(const Line& other)
{
    _k = other._k;
    _b = other._b;
    _type = other._type;
}
Line Line::makePerpendicular(const Line& to, const Point& from)
{
    /**
     * @brief Random constant, should be > 0
     */
    const unsigned int yDiff = 5;
    switch (to.getType()) {
        case LineType::CONST_X:
            // Perpendicular is CONST_Y, y = from.Y
            return Line { 0, from.Y() };
        case LineType::CONST_Y:
            // Perpendicular is CONST_X, x = from.X
            // We should use constructor by 2 points because y = kx + b not
            // represent equation x = const
            return Line { from, Point { from.X(), from.Y() + yDiff } };
        case LineType::NORMAL:
            // Perpendicular is NORMAL, k = -1/to.k and 'to' on perpendicular
            {

```

```

        const double k = -1 / to.K();
        const double b = from.Y() + from.X() / to.K();
        return Line(k, b);
    }
    default:
        return Line(0, 0);
    }
}

Point Line::intersect(const Line& first, const Line& second)
{
    if (first._type == second._type) {
        return intersectEqualType(first, second);
    } else if (first._type == LineType::NORMAL ||
               second._type == LineType::NORMAL) {
        return intersectSubNormalType(first, second);
    } else {
        // first is CONST_Y, second is CONST_X or vice versa
        // Make first is CONST_X
        Line f { first }, s { second };
        if (f._type != LineType::CONST_X)
            Line::swap(f, s);
        return Point { f._x, s._y };
    }
}

bool Line::isPerpendicular(const Line& other, double precision) const
{
    switch (_type) {
        case LineType::CONST_X:
            return other._type == LineType::CONST_Y;
        case LineType::CONST_Y:
            return other._type == LineType::CONST_X;
        case LineType::NORMAL: {
            return areEqual(other._k, -1 / _k, precision);
        }
        default:
            break;
    }
    return false;
}

bool Line::isOnSameLine(const Point& a, const Point& b, const Point& c)
{

```



```

    return Line(a, b).isBelongs(c);
}

bool Line::isOnSameLine(const ComplexNumber& a, const ComplexNumber& b,
                        const ComplexNumber& c)
{
    return isOnSameLine(
        static_cast< Point >(a), static_cast< Point >(b), static_cast< Point >(c));
}

void Line::swap(Line& left, Line& right)
{
    Line tmp { left };
    left = right;
    right = tmp;
}

#pragma region Implementation
void Line::LineEquation::initByLineType()
{
    switch (type) {
        case LineType::CONST_X:
            // Y may be any, x = const
            _k = 0;
            _b = std::numeric_limits< double >::infinity();
            _x = _pointB.X();
            break;
        case LineType::CONST_Y:
            // X may be any, y = const
            _k = 0;
            _b = 0;
            _y = _pointB.Y();
            break;
        case LineType::NORMAL:
            // Normal line, y = kx + b
            _k = yDiff / xDiff;
            _b = (-_pointA.X() * yDiff + _pointA.Y() * xDiff) / xDiff;
            break;
        default:
            break;
    }
}

Line::LineEquation::LineEquation(const ComplexNumber& a,
                                const ComplexNumber& b) :

```

```

LineEquation(static_cast< Point >(a), static_cast< Point >(b))
{
}
Line::LineEquation::LineEquation(const Point& a, const Point& b)
{
    if (a == b || std::isinf(a.X()) || std::isinf(b.X()) || std::isinf(a.Y()) ||
        std::isinf(b.Y()))
        throw std::runtime_error(
            "Cannot create line from 2 equal points, or coordinates incorrect (a.e.
            Inf)");
    _pointA = a, _pointB = b;
    yDiff = _pointB.Y() - _pointA.Y();
    xDiff = _pointB.X() - _pointA.X();
    type = (xDiff == 0) ? LineType::CONST_X
        : ((yDiff == 0) ? LineType::CONST_Y : LineType::NORMAL);
    initByLineType();
    _inited = true;
    return;
}
Point intersectEqualType(const Line& first, const Line& second)
{
    switch (first.getType()) {
        case LineType::CONST_X:
        case LineType::CONST_Y:
            return Point { std::numeric_limits< double >::infinity(),
                std::numeric_limits< double >::infinity() };
        case LineType::NORMAL: {
            const double x = (second.B() - first.B()) / (first.K() - second.K());
            const double y = second.y(x);
            return Point { x, y };
        }
        default:
            return Point();
    }
}
Point intersectSubNormalType(const Line& first, const Line& second)
{
    Line f { first }, s { second };
    /**
     * @brief Random constant value
     */

```

```

const unsigned int cv = 0;
// Make first is NORMAL
if (f.getType() != LineType::NORMAL)
    Line::swap(f, s);
switch (s.getType()) {
    case LineType::CONST_X:
        return Point { s.x(cv), f.y(s.x(cv)) };
    case LineType::CONST_Y:
        return Point { f.x(s.y(cv)), s.y(cv) };
    default:
        return Point();
}
}
#pragma endregion

```

Point.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_POINT_HPP
#define COURSEWORK_4_1_POINT_HPP
class Point
{
private:
    double _x, _y;
public:
    Point(double x = 0, double y = 0) : _x(x), _y(y) {};
    bool operator==(const Point& a) const
    {
        return X() == a.X() && Y() == a.Y();
    }
    bool operator!=(const Point& a) const { return !(*this == a); }
    Point operator-(const Point& other) const
    {
        return Point(_x - other._x, _y - other._y);
    }
    Point operator+(const Point& other) const
    {
        return Point(_x + other._x, _y + other._y);
    }
    const double& X() const
    {
        return _x;
    }

```

```

}
const double& Y() const { return _y; }
static Point middle(const Point& a, const Point& b)
{
    return Point((a._x + b._x) / 2, (a._y + b._y) / 2);
}
static Point zero() { return Point { 0, 0 }; }
/**
 * @brief Does check is point has one or both coordinates at infinity
 *
 * @param point A point that need to check
 */
static bool isAtInfinity(const Point& point);
};
#endif // COURSEWORK_4_1_POINT_HPP

```

Point.cpp:

```

#include "Point.hpp"
#include <cmath>
bool Point::isAtInfinity(const Point& point)
{
    return std::isinf(point._x) || std::isinf(point._y);
}

```

Circle.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_CIRCLE_HPP
#define COURSEWORK_4_1_CIRCLE_HPP
#include "Angle.hpp"
#include "Point.hpp"
#include <cstdint>
#include <utility>
class Circle
{
private:
    Point _center;
    double _radius;
public:
    enum ApproximationMethod
    {
        BY_X_AXIS, // Point's X coordinate should be remain untouched

```

```

    BY_Y_AXIS // Point's Y coordinate should be remain untouched
};
Circle(const Point& center, double radius);
Circle(const Point& a, const Point& b, const Point& c);
Point center() const { return _center; }
const double& radius() const { return _radius; }
std::pair< double, double > y(double x) const;
std::pair< double, double > x(double y) const;
bool isBelongs(const Point& a) const;
/**
 * @brief Does check is Point belongs to this circle with precision up to dds
 * digits after decimal separator
 *
 * @param a A point that need to check
 * @param dds Compare precision - digits after decimal separator
 */
bool isBelongs(const Point& a, int8_t dds) const;
/**
 * @brief Get the angle of the point.
 *
 * @param a Point. Should belongs to this circle, otherwise angle will be
 * calculated approximately
 * @return Angle of the point
 */
Angle getAngle(const Point& a) const;
/**
 * @brief Get the point by its angle.
 *
 * @param a Angle
 * @return Point defined by angle
 */
Point getPoint(const Angle& a) const;
/**
 * @brief Get the exact point, that belongs to this circle
 *
 * @param a A point that need to clarify
 * @param m approximation method
 * @return Point - resulted point, that belongs to this circle
 */
Point getExactPoint(const Point& a, ApproximationMethod m = BY_Y_AXIS) const;
~Circle();

```

```
};
#endif // COURSEWORK_4_1_CIRCLE_HPP
```

Circle.cpp:

```
#include "Circle.hpp"
#include "Line.hpp"
#include "functions.hpp"
#include <cmath>
#include <exception>
Circle::Circle(const Point& center, double radius)
{
    bool isValidInput = !std::isinf(radius) && !Point::isAtInfinity(center);
    if (!isValidInput)
        throw std::runtime_error(
            "Cannot construct the circle for infinity radius or center");
    _center = center;
    _radius = radius;
}
Circle::Circle(const Point& a, const Point& b, const Point& c)
{
    if (Line(a, b).isBelongs(c))
        throw std::runtime_error(
            "Cannot construct the circle by 3 points. They belongs same line");
    /**
     * @brief Calculated coordinates of circle _center
     * @see https://en.wikipedia.org/wiki/Ellipse#Circles
     */
    double X, Y;
    const double &aX = a.X(), &aY = a.Y(), &bX = b.X(), &bY = b.Y(), &cX = c.X(),
                &cY = c.Y();
    const double denominator =
        (aX * (bY - cY) + bX * (cY - aY) + cX * (aY - bY));
    X = (-1.0 / 2.0) *
        (aY * ((power(bX, 2) + power(bY, 2)) - (power(cX, 2) + power(cY, 2))) +
        bY * ((power(cX, 2) + power(cY, 2)) - (power(aX, 2) + power(aY, 2))) +
        cY * ((power(aX, 2) + power(aY, 2)) - (power(bX, 2) + power(bY, 2)))) /
        denominator;
    Y = (1.0 / 2.0) *
        (aX * ((power(bX, 2) + power(bY, 2)) - (power(cX, 2) + power(cY, 2))) +
        bX * ((power(cX, 2) + power(cY, 2)) - (power(aX, 2) + power(aY, 2))) +
        cX * ((power(aX, 2) + power(aY, 2)) - (power(bX, 2) + power(bY, 2)))) /
```

```

        denominator;
        _center = Point(X, Y);
        _radius = sqrt(power(aX - _center.X(), 2) + power(aY - _center.Y(), 2));
    }
    bool Circle::isBelongs(const Point& a) const
    {
        return almost_equal(power(a.X() - _center.X(), 2) +
                             power(a.Y() - _center.Y(), 2),
                             power(_radius, 2));
    }
    bool Circle::isBelongs(const Point& a, int8_t dds) const
    {
        if (dds < 0)
            throw std::invalid_argument(
                "Circle::isBelongs: cannot set negative precision");
        return round(power(a.X() - _center.X(), 2) + power(a.Y() - _center.Y(), 2),
                      dds) == round(power(_radius, 2), dds);
    }
    std::pair< double, double > Circle::y(double x) const
    {
        const double value =
            std::sqrt(power(_radius, 2) - power(x - _center.X(), 2));
        return { _center.Y() + value, _center.Y() - value };
    }
    std::pair< double, double > Circle::x(double y) const
    {
        const double value =
            std::sqrt(power(_radius, 2) - power(y - _center.Y(), 2));
        return { _center.X() + value, _center.X() - value };
    }
    Angle Circle::getAngle(const Point& a) const
    {
        Point exact { a };
        if (!this->isBelongs(exact))
            exact = getExactPoint(exact);
        Line l(_center, exact);
        switch (l.getType()) {
            case LineType::CONST_X:
                return (a.Y() > _center.Y()) ? Angle(90.0) : Angle(270.0);
            case LineType::CONST_Y:
                return (a.X() > _center.X()) ? Angle(0.0) : Angle(180.0);
        }
    }

```

```

    case LineType::NORMAL: {
        double degree = std::atan(1.K()) * 180 / M_PI;
        if (a.X() < _center.X())
            degree = 360.0 - degree;
        if (degree < 0)
            degree = 360.0 + degree;
        return Angle(degree);
    }
    default:
        break;
}
throw std::runtime_error("Cannot get angle of the point on circle");
}
Point Circle::getPoint(const Angle& a) const
{
    /**
     * @brief Convert degrees in radians and getting not scaled X
     */
    const double xRaw = std::cos(a.degrees() * M_PI / 180.0);
    const double x = xRaw * _radius + _center.X();
    auto yValues = y(x);
    const double y = (a.degrees() > 180.0)
        ? std::min(yValues.first, yValues.second)
        : std::max(yValues.first, yValues.second);
    return Point(x, y);
}
Point Circle::getExactPoint(const Point& a, ApproximationMethod m) const
{
    switch (m) {
        case BY_X_AXIS: {
            auto yValues = y(a.X());
            const double y = (std::fabs(yValues.first - a.X()) <
                std::fabs(yValues.second - a.X()))
                ? yValues.first
                : yValues.second;
            return Point(a.X(), y);
        }
        case BY_Y_AXIS: {
            auto xValues = x(a.Y());
            const double x = (std::fabs(xValues.first - a.Y()) <
                std::fabs(xValues.second - a.Y()))

```



```

        ? xValues.first
        : xValues.second;
    return Point(x, a.Y());
}
default:
    break;
}
return Point::zero();
}
Circle::~~Circle()
{
    _center.~Point();
}

```

CircleArc.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_CIRCLEARC_HPP
#define COURSEWORK_4_1_CIRCLEARC_HPP
#include "Angle.hpp"
#include "Circle.hpp"
class CircleArc
{
private:
    const Circle& _circle;
    /**
     * @brief Describes boundaries info:
     * 0 - left angle
     * 1 - right angle
     */
    Angle _boundaries[2];
    /**
     * @brief Does finish initialization by 3 points. The _circle must be defined
     * before call.
     */
    void initByExactValues(const Point& a, const Point& b,
                           const Point& betweenAB);
public:
    /**
     * @brief Construct a new circle arc by source circle and 3 points. All
     * points should to be at the circle and not equal each other.
     */
}

```

```

    * @param circle Source circle
    * @param a Begin point of the arc
    * @param b End point of the arc
    * @param betweenAB A point between a,b. Needed for unambiguous
    * constructing resulted arc.
    */
CircleArc(const Circle& circle, const Point& a, const Point& b,
          const Point& betweenAB);
/**
    * @param approximate Construct circle arc by approximate points. Exact
    * values will be given from the circle.
    */
CircleArc(const Circle& circle, const Point& a, const Point& b,
          const Point& betweenAB, bool approximate);
/**
    * @brief Does check is Point belongs to this circle arc
    *
    * @param point A point that need to check
    */
bool isBelongs(const Point& point) const;
Point middle() const;
~CircleArc();
};
#endif // COURSEWORK_4_1_CIRCLEARC_HPP

```

CircleArc.cpp:

```

#include "CircleArc.hpp"
#include "functions.hpp"
#include <cmath>
#include <stdexcept>
void CircleArc::initByExactValues(const Point& a, const Point& b,
                                  const Point& betweenAB)
{
    bool isValidInput = _circle.isBelongs(a) && _circle.isBelongs(b) &&
        _circle.isBelongs(betweenAB) && a != b && b != betweenAB;
    if (!isValidInput)
        throw std::invalid_argument(
            "CircleArc: Cannot construct. One or more points not at the circle or points
            equal");
    Angle angles[3] { _circle.getAngle(a),
        _circle.getAngle(b),

```

```

        _circle.getAngle(betweenAB) };
    const Angle& min = std::min(angles[0], angles[1]);
    const Angle& max = (min == angles[0]) ? angles[1] : angles[0];
    const Angle& between = angles[2];
    if (between > max) {
        _boundaries[0] = min;
        _boundaries[1] = max;
    } else {
        _boundaries[0] = max;
        _boundaries[1] = min;
    }
}

CircleArc::CircleArc(const Circle& circle, const Point& a, const Point& b,
                    const Point& betweenAB) :
    _circle(circle)
{
    initByExactValues(a, b, betweenAB);
}

CircleArc::CircleArc(const Circle& circle, const Point& a, const Point& b,
                    const Point& betweenAB, bool approximate) :
    _circle(circle)
{
    if (approximate) {
        initByExactValues(_circle.getExactPoint(a),
                        _circle.getExactPoint(b),
                        _circle.getExactPoint(betweenAB));
    } else
        initByExactValues(a, b, betweenAB);
}

bool CircleArc::isBelongs(const Point& point) const
{
    Point tmp = point;
    if (!_circle.isBelongs(tmp))
        tmp = _circle.getExactPoint(tmp);
    const Angle &left = _boundaries[0], &right = _boundaries[1];
    const Angle& input = _circle.getAngle(point);
    if (left <= input && input <= right)
        return true;
    else
        return false;
    throw std::runtime_error(

```

```

        "CircleArc::isBelongs: passed invalid point, we tried to fix it but no
        success.");
    }
Point CircleArc::middle() const
{
    const Angle &left = _boundaries[0], &right = _boundaries[1];
    double degrees;
    if (left < right) {
        degrees = (left + right).degrees() / 2;
        return _circle.getPoint(Angle(degrees));
    } else if (left > right) {
        degrees = (left + (Angle::fullAngle() - left + right) / 2).degrees();
        return _circle.getPoint(degrees);
    } else {
        return _circle.getPoint(left);
    }
    throw std::runtime_error(
        "CircleArc::middle: cannot construct middle. This is bug.");
}
CircleArc::~CircleArc()
{
    _boundaries[0].~Angle();
    _boundaries[1].~Angle();
}

```

LineSegment.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_LINESEGMENT_HPP
#define COURSEWORK_4_1_LINESEGMENT_HPP
#include "Line.hpp"
class LineSegment
{
private:
    Line _line;
    Point _endpoints[2];
public:
    LineSegment(const Point& a = Point(0, 0), const Point& b = Point(1, 0));
    LineSegment(const Line& l, const Point endpoints[2]);
    std::pair< Point, Point > getEndpoints() const;
    double length() const;
    /**

```

```

    * @brief Move this line segment along the specified segment
    *
    * @param other The line segment along which the segment will move. One of it
    * endpoints must be endpoint of this segment
    */
    LineSegment move(const LineSegment& other) const;
    ~LineSegment();
};
#endif // COURSEWORK_4_1_LINESEGMENT_HPP

```

LineSegment.cpp:

```

#include "LineSegment.hpp"
#include "functions.hpp"
#include "tfunctions.hpp"
#include <cmath>

LineSegment::LineSegment(const Point& a, const Point& b) :
    _line(a, b), _endpoints { a, b }
{
}

LineSegment::LineSegment(const Line& l, const Point endpoints[2]) :
    _line(l), _endpoints { endpoints[0], endpoints[1] }
{
    bool isPointsCorrect =
        l.isBelongs(endpoints[0]) && l.isBelongs(endpoints[1]);
    if (!isPointsCorrect)
        throw std::runtime_error(
            "Cannot construct line segment: endpoints not on source line");
}

std::pair< Point, Point > LineSegment::getEndpoints() const
{
    return std::pair< Point, Point > { _endpoints[0], _endpoints[1] };
}

double LineSegment::length() const
{
    // ((a_x-b_x)^2+(a_y-b_y)^2)^(1/2)
    return sqrt(power(_endpoints[1].X() - _endpoints[0].X(), 2) +
        power(_endpoints[1].Y() - _endpoints[0].Y(), 2));
}

LineSegment LineSegment::move(const LineSegment& other) const
{
    const std::pair< Point, Point >& endpoints = other.getEndpoints();

```

```

const Point otherPoints[2] { endpoints.first, endpoints.second };
uint8_t thisIdx = 0, otherIdx = 0;
if (_endpoints[0] == endpoints.first) {
    otherIdx = 1;
} else if (_endpoints[1] == endpoints.first) {
    otherIdx = 1;
    thisIdx = 1;
} else if (_endpoints[1] == endpoints.second) {
    otherIdx = 0;
    thisIdx = 1;
} else
    throw std::invalid_argument(
        "LineSegment::move: one of argument endpoints must be enpoint of this
        segment");
double dx, dy;
dx = otherPoints[otherIdx].X() - _endpoints[thisIdx].X();
dy = otherPoints[otherIdx].Y() - _endpoints[thisIdx].Y();
Point movePoint(dx, dy);
return LineSegment(_endpoints[0] + movePoint, _endpoints[1] + movePoint);
}
LineSegment::~LineSegment()
{
    /**
     * @brief Cleanup of points and line
     */
    _line.~Line();
    _endpoints[0].~Point();
    _endpoints[1].~Point();
}

```

Angle.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_ANGLE_HPP
#define COURSEWORK_4_1_ANGLE_HPP
class Angle
{
private:
    /**
     * @brief Value in degrees. Must be between 0 and 360
     */
    double _degrees;

```

```

public:
    /**
     * @brief Construct a new Angle object by degrees
     *
     * @param value an angle in degrees
     */
    Angle(double value = 0.0);
    bool operator==(const Angle& other) const;
    bool operator!=(const Angle& other) const;
    bool operator>(const Angle& other) const;
    bool operator<(const Angle& other) const;
    bool operator<=(const Angle& other) const;
    bool operator>=(const Angle& other) const;
    Angle operator+(const Angle& other) const;
    Angle operator-(const Angle& other) const;
    /**
     * @brief Divide angle value to number
     *
     * @param value Number that will divides this angle
     */
    Angle operator/(const double& number) const;
    /**
     * @brief Return value of this angle in degrees
     */
    double degrees() const { return _degrees; }
    static Angle fullAngle();
};
#endif // COURSEWORK_4_1_ANGLE_HPP

```

Angle.cpp:

```

#include "Angle.hpp"
#include <cmath>
#include <stdexcept>
Angle::Angle(double value)
{
    if (0.0 <= value && value <= 360.0 && !std::isinf(value))
        _degrees = value;
    else
        throw std::runtime_error(
            "Cannot construct Angle by incorrect degrees value (" +
            std::to_string(value) + ")");
}

```

```

}
bool Angle::operator==(const Angle& other) const
{
    return _degrees == other._degrees;
}
bool Angle::operator!=(const Angle& other) const
{
    return !(*this == other);
}
bool Angle::operator>(const Angle& other) const
{
    return _degrees > other._degrees;
}
bool Angle::operator<(const Angle& other) const
{
    return _degrees < other._degrees;
}
bool Angle::operator<=(const Angle& other) const
{
    return *this == other || *this < other;
}
bool Angle::operator>=(const Angle& other) const
{
    return *this == other || *this > other;
}
Angle Angle::operator+(const Angle& other) const
{
    double result = _degrees + other._degrees;
    if (result > 360.0) {
        result = std::fmod(result, fullAngle()._degrees);
    }
    return Angle(result);
}
Angle Angle::operator-(const Angle& other) const
{
    return Angle(_degrees - other._degrees);
}
Angle Angle::operator/(const double& number) const
{
    return Angle(_degrees / number);
}

```



```

Angle Angle::fullAngle()
{
    return Angle(360.0);
}

```

Quadrilateral.hpp:

```

#ifndef COURSEWORK_4_1_QUADRILATERAL_HPP
#define COURSEWORK_4_1_QUADRILATERAL_HPP
#include "Point.hpp"
class Quadrilateral
{
    private:
        Point A, B, C, D;
    public:
        Quadrilateral(const Point& a, const Point& b, const Point& c,
                      const Point& d);
        ~Quadrilateral();
};
#endif // COURSEWORK_4_1_QUADRILATERAL_HPP

```

Quadrilateral.cpp:

```

#include "Quadrilateral.hpp"
#include "Line.hpp"
Quadrilateral::Quadrilateral(const Point& a, const Point& b, const Point& c,
                             const Point& d)
{
    if (Line::isOnSameLine(a, b, c) || Line::isOnSameLine(a, b, d) ||
        Line::isOnSameLine(a, c, d) || Line::isOnSameLine(b, c, d)) {
        throw std::invalid_argument(
            "Quadrilateral: cannot construct object. Points must be not on same line.");
    }
    A = a, B = b, C = c, D = d;
}
Quadrilateral::~~Quadrilateral()
{
    A.~Point();
    B.~Point();
    C.~Point();
    D.~Point();
}

```

functions.hpp:

```
#ifndef CPPLIB_FUNCTIONS_HPP
#define CPPLIB_FUNCTIONS_HPP
#include <cmath>
#include <iostream>
#include <limits>
int getRandomNumber(int from, int to);
/**
 * @brief Round double to specified digits after decimal separator
 *
 * @param number source number
 * @param dds amount digits after decimal separator. Should be positive
 * @return double - Rounded number
 */
double round(double number, int8_t dds = 0);
/**
 * @brief Compare 2 numbers with specified precision
 *
 * @param a first number
 * @param b second number
 * @param dds Compare precision - digits after decimal separator. Should be
 * positive
 * @return true if the numbers are equal, false otherwise
 */
bool areEqual(double a, double b, int8_t dds = 0);
/**
 * @brief Compare 2 numbers with specified precision
 *
 * @param a first number
 * @param b second number
 * @param precision Compare precision. Should be positive
 * @return true if the numbers are differs lesser than specified precision
 * value, false otherwise
 */
bool areEqual(double a, double b, double precision = 0.01);
template< class T >
T power(T a, uint power)
{
    if (power == 0)
        return 1;
    T result = a;
```

```

while (power != 1) {
    result *= a;
    --power;
}
return result;
}

template< class T >
typename std::enable_if< !std::numeric_limits< T >::is_integer, bool >::type
almost_equal(
    T x, T y, int ulp = 2)
{
    // the machine epsilon has to be scaled to the magnitude of the values
    // used and multiplied by the desired precision in ULPs (units in the
    // last place)
    return std::fabs(x - y) <=
        std::numeric_limits< T >::epsilon() * std::fabs(x + y) * ulp
        // unless the result is subnormal
        || std::fabs(x - y) < std::numeric_limits< T >::min();
}

int getNumberDigits(int number);
#endif // CPPLIB_FUNCTIONS_HPP

```

functions.cpp:

```

#include <chrono>
#include <cstring>
#include <random>
#include "functions.hpp"
int getRandomNumber(int from, int to)
{
    try {
        if (from > to)
            throw std::runtime_error(
                "Incorrect couple 'from - to' for generating random numbers");
    } catch (const std::runtime_error& err) {
        std::cerr << err.what() << '\n';
        exit(1);
    }
    unsigned int now = static_cast< unsigned >(
        std::chrono::high_resolution_clock::now().time_since_epoch().count() %
        10000);
    std::mt19937 engine(now);

```

```

    std::uniform_int_distribution< int > random(from, to);
    return random(engine);
}

double round(double number, int8_t dds)
{
    if (dds < 0)
        throw std::invalid_argument("round: dds should be positive.");
    uint mult = 1;
    while (dds != 0) {
        mult *= 10;
        --dds;
    }
    return std::round(number * mult) / static_cast< double >(mult);
}

bool areEqual(double a, double b, int8_t dds)
{
    if (dds < 0)
        throw std::invalid_argument("areEqual: dds should be positive.");
    return round(a, dds) == round(b, dds);
}

bool areEqual(double a, double b, double precision)
{
    if (precision < 0.0)
        throw std::invalid_argument("areEqual: precision should be positive.");
    return std::fabs(a - b) <= precision;
}

int getNumberDigits(int number)
{
    int numberDigits = 0;
    while (number != 0) {
        ++numberDigits;
        number /= 10;
    }
    return numberDigits;
}

```