Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ **Информатика и системы управления**

КАФЕДРА **Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии (ИУ7)**

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ **09.03.04 Программная инженерия**

Отчет по лабораторной работе №6 по дисциплине анализ алгоритмов

Тема:

Студент: Серова М.Н.

Группа: ИУ7-55Б

Оценка (баллы): ________________

Преподаватель: Волкова Л.Л.

Москва, 2021

Оглавление

Введение

Одна из самых известных и важных задач транспортной логистики (и комбинаторной оптимизации) – задача коммивояжёра или "задача о странствующем торговце". Суть задачи сводится к поиску оптимального (кратчайшего, быстрейшего или самого дешевого) пути, проходящего через промежуточный пункты по одному разу и возвращающегося в исходную точку. К примеру, нахождение наиболее выгодного маршрута, позволяющего коммивояжёру посетить со своим товаром определенные города по одному разу и вернуться обратно. Мерой выгодности маршрута может быть минимальное время поездки, минимальные расходы на дорогу или минимальная длина пути. В наше время, когда стоимость доставки часто бывает сопоставима со стоимостью самого товара, а скорость доставки - один из главных приоритетов, задача нахождения оптимального маршрута приобретает огромное значение [**?**].

1 Аналитическая часть

В данном разделе будет поставлена цель и описаны задачи описана теоретическая часть муравьиного алгоритма и полного перебора.

Целью данной лабораторной работы является провести сравнительный анализ метода полного перебора и эвристического метода на базе муравьиного алгоритма.

Для достижения поставленной цели требуется выполнить следующие задачи.

1. Реализовать метод полного перебора и метод на базе муравьиного алгоритма для решения задачи коммивояжёра с возвращением последнего в город, с которого он начал обход.

2. Провести параметризацию второго метода для выбранного класса задач, т.е. определить такие комбинации параметров или их диапазонов, при которых метод даёт наилучшие результаты на выбранном(ых) классе(ах) задач.

3. Провести тестирование.

4. Описать и обосновать полученные результаты в отчете.

1.1 Муравьиные алгоритмы.

Муравьиные алгоритмы представляют собой вероятностную жадную эвристику, где вероятности устанавливаются, исходя из информации о качестве решения, полученной из предыдущих решений.

Идея муравьиного алгоритма - моделирование поведения муравьёв, связанного с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. При своём движении муравей метит путь феромоном, и эта информация используется другими муравьями для выбора пути. Это элементарное правило поведения и определяет способность муравьёв находить новый путь, если старый оказывается недоступным.

Рассмотрим случай, показанный на рисунке 1.1, когда на оптимальном доселе пути возникает преграда. В этом случае необходимо определение нового оптимального пути. Дойдя до преграды, муравьи с равной вероятностью будут обходить её справа и слева. То же самое будет происходить и на обратной стороне преграды. Однако, те муравьи, которые случайно выберут кратчайший путь, будут быстрее его проходить, и за несколько передвижений он будет более обогащён феромоном. Поскольку движение муравьёв определяется концентрацией феромона, то следующие будут предпочитать именно этот путь, продолжая обогащать его феромоном до тех пор, пока этот путь по какой-либо причине не станет недоступен.

Очевидная положительная обратная связь быстро приведёт к тому, что кратчайший путь станет единственным маршрутом движения большинства муравьёв. Моделирование испарения феромона - отрицательной обратной связи - гарантирует нам, что найденное локально оптимальное решение не будет единственным - муравьи будут искать и другие пути. Если мы моделируем процесс такого поведения на некотором графе, рёбра которого представляют собой возможные пути перемещения муравьёв, в течение определённого времени, то наиболее обогащённый феромоном путь по рёбрам этого графа и будет являться решением задачи, полученным с помощью муравьиного алгоритма [?].

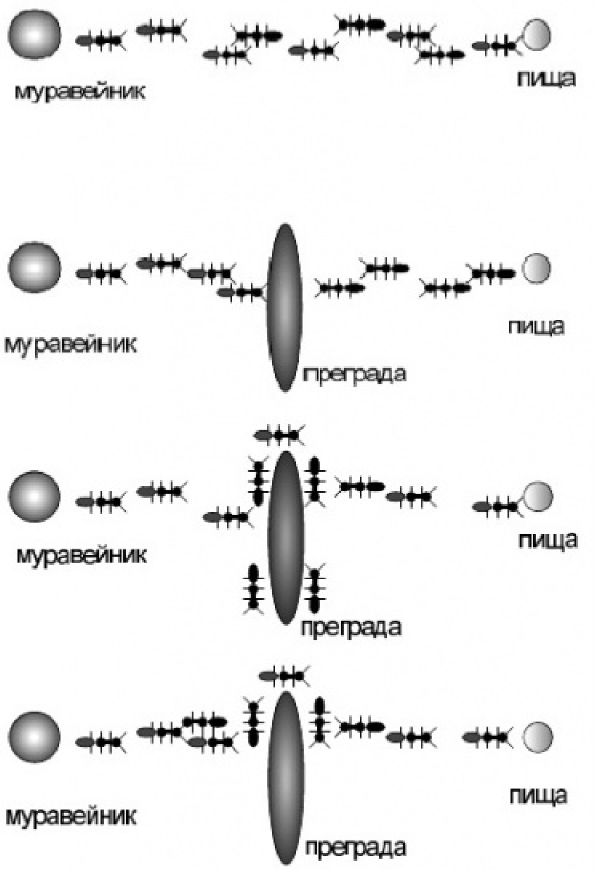


Рис. 1.1: Схема движения муравьёв.

1.2 Применение для задачи коммивояжёра

Любой муравьиный алгоритм, независимо от модификаций, представим в следующем виде.

1. Создаем муравьёв.

   Стартовая точка, куда помещается муравей, зависит ограничений, накладываемых условиями задачи. Потому что для каждой задачи способ размещения муравьёв является определяющим. Либо все они помещаются в одну точку, либо в разные с повторения, либо без повторений.

   На этом же этапе задается начальный уровень феромона. Он инициализируется небольшим положительным числом для того, чтобы на начальном шаге вероятности перехода в следующую вершину не были нулевыми.

2. Ищем решения.

Вероятность перехода из вершины i в вершину j определяется по следующей формуле:

$$P_{ij,k}(t) = \begin{cases} \dfrac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha} \cdot [\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum\limits_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^{\alpha} \cdot \eta_{il}]^{\beta}} & , j \in J_{i,k}; \\ 0 & , j \notin J_{i,k} \end{cases} \tag{1.1}$$

где

$\tau_{i,j}$ – расстояние от города i до j;

$\eta_{i,j}$ – количество феромонов на ребре ij;

α – параметр влияния длины пути;

β – параметр влияния феромона.

3. Обновляем феромон.

Уровень феромона обновляется в соответствии с приведённой формулой: После того, как муравей успешно проходит маршрут, он оставляет на всех пройденных ребрах след, обратно пропорциональный длине пройденного пути:

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j}, \tag{1.2}$$

где

$\rho_{i,j}$ – доля феромона, который испарится;

$\tau_{i,j}$ – количество феромона на дуге ij;

$\Delta\tau_{i,j}$ – количество отложенного феромона.

Также нужно заметить, что количество отложенного феромона ($\tau_{i,j}$) является суммой всех $\Delta\tau_{i,j}^{k}$:

$$\Delta\tau_{i,j}^{k} = \begin{cases} Q/L_k & \text{Если k-ый мурваей прошел по ребру ij;} \\ 0 & \text{Иначе} \end{cases} \tag{1.3}$$

где

Q – количество феромона, переносимого муравьем;

L_k – стоимость k-го пути муравья (обычно длина).

Теперь с учетом особенностей задачи коммивояжёра, мы можем описать локальные правила поведения муравьев при выборе пути.

1. Муравьи имеют собственную «память». Поскольку каждый город может быть посещён только один раз, то у каждого муравья есть список уже посещенных городов - список запретов. Обозначим через J список городов, которые необходимо посетить муравью k , находящемуся в городе i .

2. Муравьи обладают «зрением» - видимость есть эвристическое желание посетить город j , если муравей находится в городе i . Будем считать, что видимость обратно пропорциональна расстоянию между городами.

3. Муравьи обладают «обонянием» - они могут улавливать след феромона, подтверждающий желание посетить город j из города i на основании опыта других муравьёв. Количество феромона на ребре (i, j) в момент времени t обозначим через $tau_{i,j}(t)$.

4. На этом основании мы можем сформулировать вероятностнопропорциональное правило, определяющее вероятность перехода k-ого муравья из города i в город j.

5. Пройдя ребро (i, j) , муравей откладывает на нём некоторое количество феромона, которое должно быть связано с оптимальностью сделанного выбора. Пусть $T_k(t)$ есть маршрут, пройденный муравьем k к моменту времени t , $L_k(t)$ - длина этого маршрута, а Q - параметр, имеющий значение порядка длины оптимального пути [**?**].

1.3 Метод полного перебора.

Метод полного перебора, по-другому именуемый методом грубой силы, является простым, логичным и широко используемым математическим методом. Он применим во многих, если не во всех, областях математики: задача коммивояжера также не является исключением. Идея brute force предельно проста: перебираются всевозможные решения и из них выбирается решение (или множество решений) отвечающее условию задачи.

В задаче коммивояжера, соответственно, требуется из всевозможных вариантов объезда пунктов выбрать маршрут, занимающий кратчайшее время (или минимальный по стоимости маршрут).

Огромным преимуществом метода полного перебора перед другими методами решения задачи коммивояжера является гарантированность нахождения наилучшего маршрута. Другие методы советуют лишь «хороший» маршрут, который совсем не обязательно является лучшим. Кроме того, к достоинствам метода относится простота его программной реализации.

Однако, в связи с наличием огромного недостатка, метод полного перебора крайне редко используется на практике. Этим недостатком является временная сложность алгоритма. Асимметричная задача коммивояжера с n посещаемых пунктов требует при полном переборе рассмотрения (n-1)! туров, а факториал растет невероятно быстро. Поэтому метод полного перебора может применяться только для задач малой размерности (при рассмотрении до двух десятков посещаемых пунктов) [4].

Вывод

В данном разделе поставлена цель и описаны задачи описана теоретическая часть муравьиного алгоритма и полного перебора.

2 Конструкторская часть

В данном разделе будет представлено описание архитектуры ПО и схемы муравьинного алгоритма и алгоритма перебором.

2.1 Требования к выводу

Вывести таблицу с результатами параметризации. Столбцы: коэффициент либо жадности, либо стадности (второй из них не приводится, т.к. он связан с другим формулой), коэффициент испарения феромона, количество поколений ("суток"жизни колонии), значение длины лучшего найденного за 2-3 прогона муравьиного алгоритма пути и разность между этим значением и эталонным (по паре столбцов длина, разность длин на каждую "карту"класса данных). До таблицы приводят эталонные длины маршрутов, полученные методом полного перебора.

2.2 Схемы алгоритмов.

На рисунках 2.1, 2.2, 2.3 представлена схема муравьиного алгоритма.

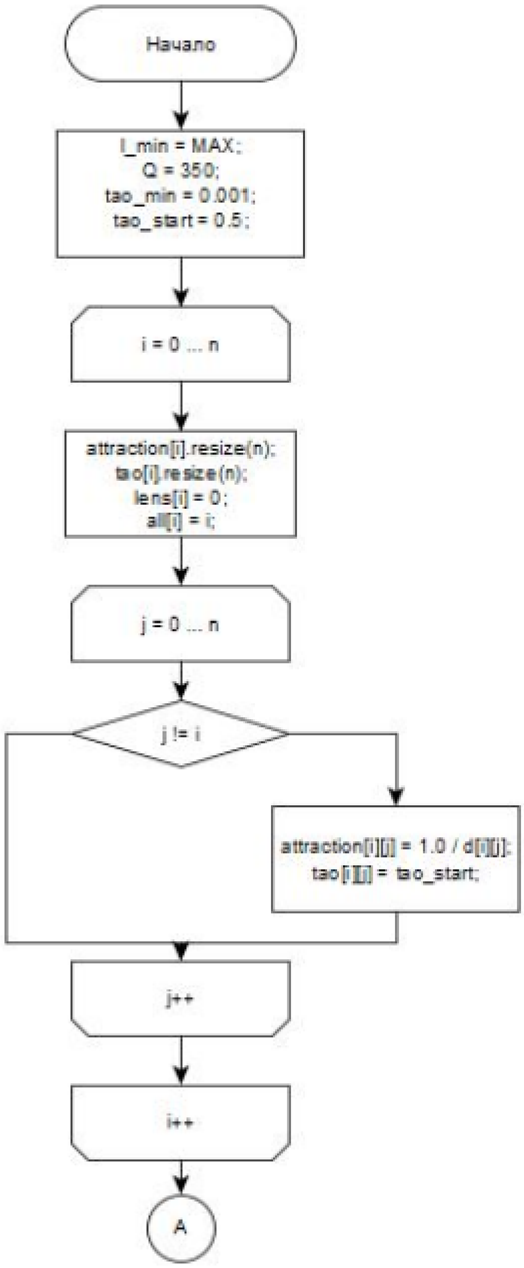


Рис. 2.1: Схема муравьиного алгоритма часть 1.

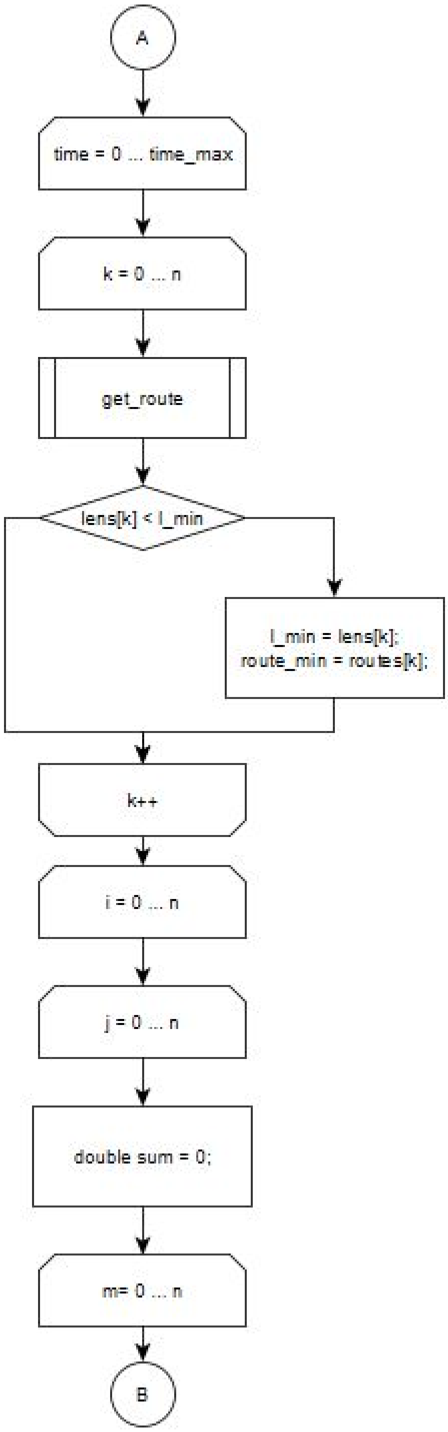


Рис. 2.2: Схема муравьиного алгоритма часть 2.

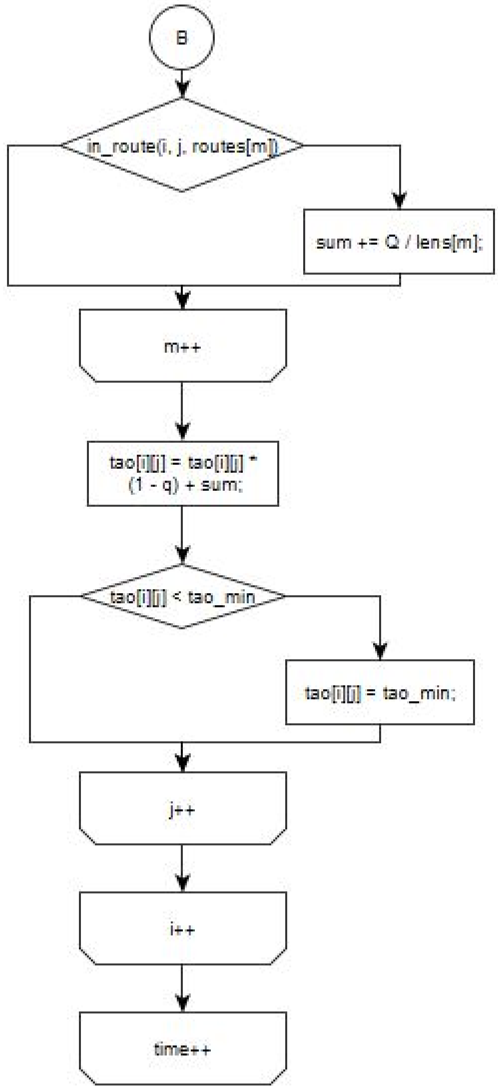


Рис. 2.3: Схема муравьиного алгоритма часть 3.

На рисунках 2.4, 2.5 представлена схема метода полного перебора.

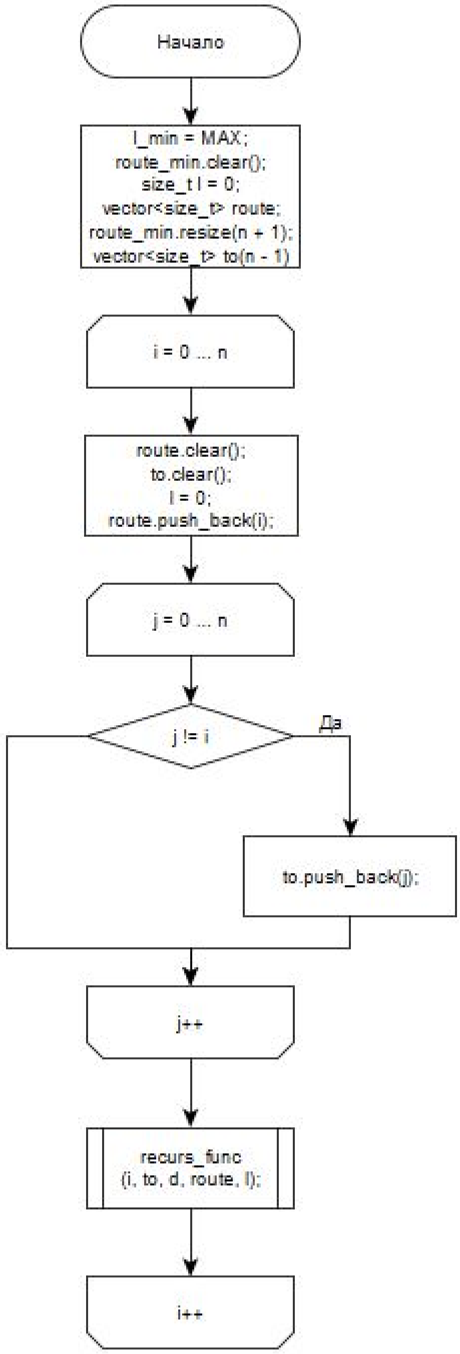


Рис. 2.4: Схема метода полного перебора часть 1.

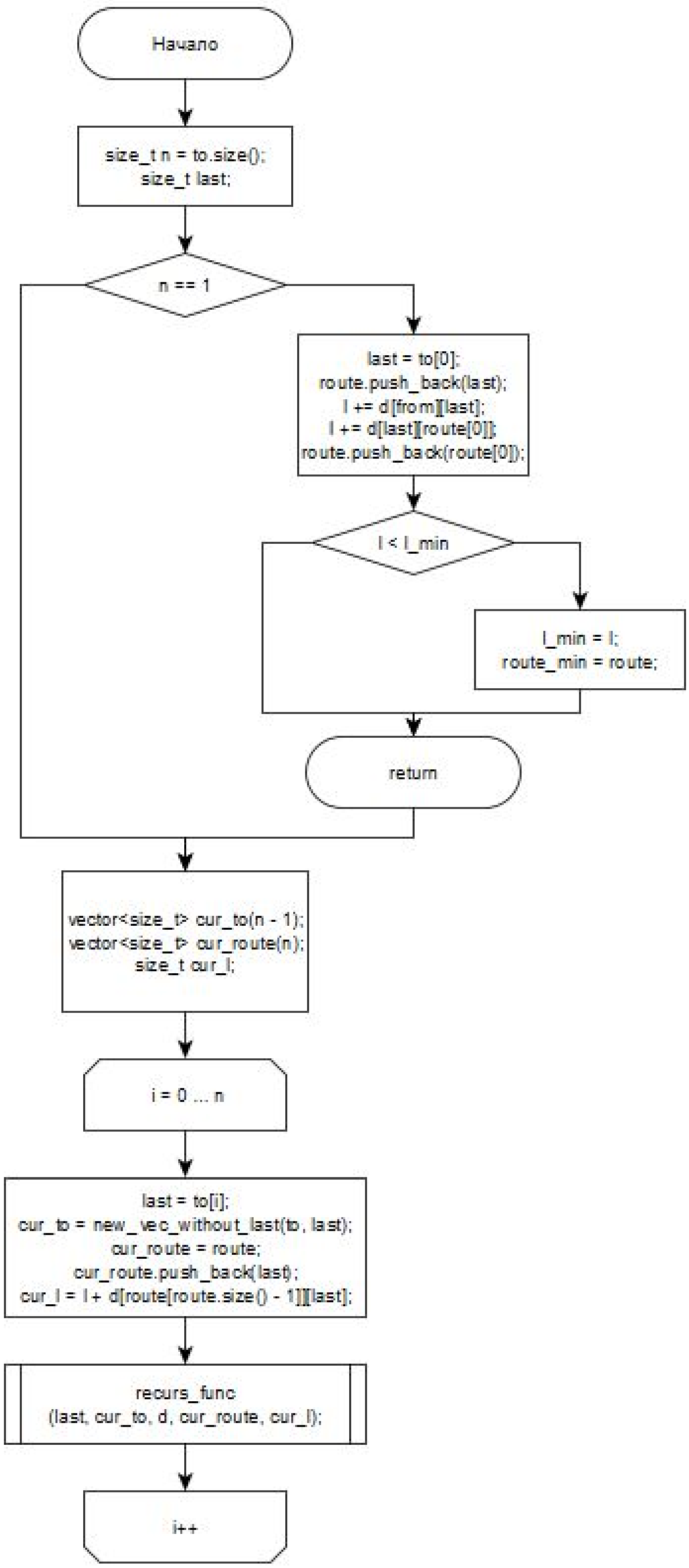


Рис. 2.5: Схема метода полного перебора часть 2.

Вывод

В данном разделе представлено описание архитектуры ПО и схемы муравьинного алгоритма и алгоритма перебором.

3 Технологическая часть

Данный раздел содержит обоснование выбора языка и среды разработки, реализацию алгоритмов.

3.1 Средства реализации

Для реализации программы был выбран язык программирования C++ []. Такой выбор обусловлен следующими причинами:

- имеет высокую производительность;
- наличие библиотек для удобной работы с векторами и замеров времени.

Для замера времени выполнения использовалась функция *clock*() из библиотеки ctime. Эта функция возвращает количество временных тактов, прошедших с начала запуска программы [?].

3.2 Реализация алгоритмов

В листингах ?? - ?? представлены реализации рассматриваемых алгоритмов.

Листинг 3.1: Реализация алгоритма полного перебора.

```
void recurs_func(size_t from, vector<size_t> to, vector<vector<
    size_t>> d, vector<size_t> route, size_t l) {

  size_t n = to.size();
  size_t last;
  if (n == 1) {
    last = to[0];
    route.push_back(last);
    l += d[from][last];
    l += d[last][route[0]];
    route.push_back(route[0]);
    if (l < l_min) {
      l_min = l;
      route_min = route;
    }
    return;
  }

```

```
  vector<size_t> cur_to(n - 1);
  vector<size_t> cur_route(n);
  size_t cur_l;
  for (size_t i = 0; i < n; i++) {
    last = to[i];
    cur_to = new_vec_without_last(to, last);
    cur_route = route;
    cur_route.push_back(last);
    cur_l = l + d[route[route.size() - 1]][last];
    recurs_func(last, cur_to, d, cur_route, cur_l);
  }

}

void perebor(size_t n, vector<vector<size_t>> d) {
  l_min = MAX;
  route_min.clear();
  size_t l = 0;
  vector<size_t> route;
  route_min.resize(n + 1);
  vector<size_t> to(n - 1);

  for (size_t i = 0; i < n; i++) {
    route.clear();
    to.clear();
    l = 0;

    route.push_back(i);
    for (size_t j = 0; j < n; j++)
      if (j != i)
        to.push_back(j);
    recurs_func(i, to, d, route, l);
  }

  cout << endl << "ROUTE: ";
  print_arr(route_min);
  cout << "LENGTH: " << l_min << endl << endl;
}
```

Листинг 3.2: Реализация муравьиного алгоритма.

```
vector<double> get_probability(size_t from, vector<size_t> to,
```

```
    vector<vector<double>> tao, vector<vector<double>> attraction,
size_t alpha, size_t beta) {

  double znam = 0, chisl = 0;
  size_t n = to.size();
  vector<double> result(n);
  for (size_t i = 0; i < n; i++) {
    znam += pow(tao[from][to[i]], alpha) * pow(attraction[from][to[i]], beta);
  }
  for (size_t j = 0; j < n; j++) {
    chisl = pow(tao[from][to[j]], alpha) * pow(attraction[from][to[j]], beta);
    result[j] = chisl / znam;
  }
  return result;
}

void get_route(vector<size_t> all, size_t start, vector<size_t> &route, size_t &len, vector<vector<size_t>> d,
vector<vector<double>> tao, vector<vector<double>> attraction,
size_t alpha, size_t beta) {

  route.resize(0);
  route.push_back(start);
  vector<size_t> to = new_vec_without_last(all, start);
  size_t n_1 = tao.size() - 2;
  size_t from;
  double coin, sum;
  bool flag;

  for (size_t i = 0; i < n_1; i++) {
    sum = 0;
    flag = true;
    from = route[i];
    vector<double> p = get_probability(from, to, tao, attraction, alpha, beta);
    coin = double(rand() % 10000) / 10000;
    for (size_t j = 0; j < p.size() && flag; j++) {
      sum += p[j];
      if (coin < sum) {
```

```
        route.push_back(to[j]);
        len += d[from][to[j]];
        to = new_vec_without_last(to, to[j]);
        flag = false;
      }
    }
  }
  len += d[route[route.size() - 1]][to[0]];
  route.push_back(to[0]);
  len += d[route[route.size() - 1]][route[0]];
  route.push_back(route[0]);
}

void ant(size_t n, vector<vector<size_t>> d, size_t alpha, size_t beta, double q, size_t time_max, ofstream& file) {

  l_min = MAX;
  route_min.clear();

  double tao_min, tao_start, Q;
  vector<size_t> all(n);
  Q = 350;
  tao_min = 0.001;
  tao_start = 0.5;

  vector<vector<size_t>> routes(n);
  vector<size_t> lens(n);

  vector<vector<double>> attraction(n);
  vector<vector<double>> tao(n);

  for (size_t i = 0; i < n; i++) {
    attraction[i].resize(n);
    tao[i].resize(n);
    lens[i] = 0;
    all[i] = i;
    for (size_t j = 0; j < n; j++) {
      if (i != j) {
        attraction[i][j] = 1.0 / d[i][j];
        tao[i][j] = tao_start;
      }
```

```
    }
  }

  for (size_t time = 0; time < time_max; time++) {
    for (size_t k = 0; k < n; k++) {
      get_route(all, k, routes[k], lens[k], d, tao, attraction,
         alpha, beta);
      if (lens[k] < l_min) {
        l_min = lens[k];
        route_min = routes[k];
      }
    }
    for (size_t i = 0; i < n; i++)
      for (size_t j = 0; j < n; j++) {
        double sum = 0;
        for (size_t m = 0; m < n; m++) {
          if (in_route(i, j, routes[m]))
            sum += Q / lens[m];
        }

          tao[i][j] = tao[i][j] * (1 - q) + sum;
          if (tao[i][j] < tao_min)
            tao[i][j] = tao_min;
        }
      }
}
```

3.3 Функциональные тесты

В первом столбце таблицы 3.1 представлена матрица расстояний, во втором - длина кратчайшего пути, в третьем найденная длина кратчайшего пути алгоритмом полного перебора. Путь найдённый алгоритмом полного перебора и результат выполнения муравьиного алгоритма представлены в приложении 1.

Таблица 3.1: Функциональные тесты

Матрица	Ожидаемая l	Фактическая l
$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 3 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 3 \\ 4 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 3 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	10	10

Фактические результаты тестов совпали с ожидаемыми результатами.

Вывод

В этом разделе обоснован выбор языка програмирования, описаны технические характеристики,приведены листинги кода реализованных алгоритмов и проведены тесты.

4 Экспериментальная часть

В данном разделе сравниваются реализованные алгоритмы, дается сравнительная оценка затрат на время.

4.1 Пример работы программы

Пример работы программы представлен на рисунке 4.1. На вход подаётся файл с матрицей расстояний. Результат работы муравьиного алгоритма записывается в файл, один из вариантов выводится в консоль. Пример файла в приложении 1.

```
1 124 33 222 126 322 543 12
124 1 124 222 123 323 222 334
33 124 1 16 444 112 46 891
222 222 16 1 544 122 56 556
126 123 444 544 1 544 233 920
322 323 112 122 544 1 555 145
543 222 46 56 233 555 1 322
12 334 891 556 920 145 322 1
Время работы полного перебора: 0.14773

Путь: 1 5 2 3 7 4 6 8 1
Длина: 746

Время работы муравьиного алгоритма: 0.042077

Путь: 5 1 8 6 4 7 3 2 5
Длина: 746
```

Рис. 4.1: Пример работы программы

4.2 Технические характеристики

Технические характеристики устройства, на котором выполнялось исследование:

- операционная система: Ubuntu 20.01 Linux x86_64 [**?**];

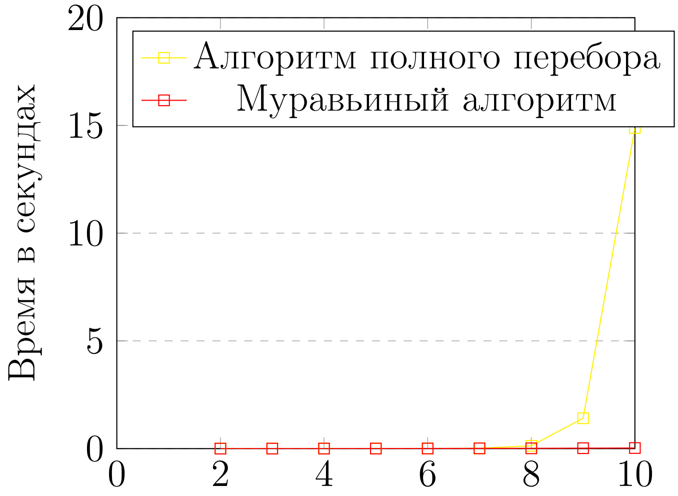
- оперативная память: 8 Гб;
- процессор: AMD Ryzen5 4500U [**?**]:
  - количество физических ядер: 6;
  - количество логических ядер: 6.

4.3 Время выполнения алгоритмов

Был проведен сравнительный анализ реализаций муравьиного алгоритма и полного перебора. Замеры времени проводились для графов с количеством вершин от 2 до 10 с шагом 1. Значения коэффициентов составили $\alpha = 0$, $t_{max} = 50$, $\rho = 0.1$.
Результаты представлены в таблице 4.1:

Таблица 4.1: Результаты замеров времени для алгоритма полного перебора и муравьиного алгоритма

Количество вершин	Полный перебор	Муравьиный алгоритм
2	0.00001	0.00041
3	0.00004	0.00096
4	0.0002	0.002
5	0.00053	0.0034
6	0.0026	0.0062
7	0.0175	0.0095
8	0.13	0.013
9	1.41	0.02
10	14.88	0.027



Разница времени выполнения алгоритмов

4.4 Параметризация муравьиного алгоритма на основании проведенного эксперимента

Для различных значений параметров α, β, ρ и t_{max} для каждой из нескольких матриц смежности с помощью муравьиного алгоритма и перебора была найдена некоторая длина маршрута. Далее выбраны наилучшие сочетания параметров муравьиного алгоритма на этих данных.

Параметр α менялся от 0 до 1 с шагом 0.25, параметр ρ менялся от 0.1 до 0.9 с шагом 0.1, параметр t_{max} менялся от 50 до 400 с шагом 50.

Были выявлены оптимальные сочетания параметров, представленные в таблице 4.2:

Таблица 4.2: Результаты решения задачи параметризации

α	β	ρ	t_{max}
4	6	0.6	20
6	4	0.3	40
1	9	0.7	50
6	4	0.9	70
3	7	0.6	80
6	4	0.25	90

Вывод

По результатам исследования муравьиный алгоритм при количестве вершин больше 6 выигрывает во времени выполнения у алгоритма полного перебора, поскольку время выполнения перебора очень быстро растет при увеличении числа вершин.

Для заданных классов данных найдены параметры, которые обеспечивают наиболее оптимальное решение.

Заключение

В процессе выполнения лабораторной работы были изучены и реализованы алгоритмы последовательного и параллельного вычисления определителя квадратной матрицы.

Было исследовано время выполнения выше обозначенных алгоритмов. В результате было выявлено, что на матрицах, размер которых не превышает 5, использование параллельных вычислений нецелесообразно из-за превышения затратами на содержание потоков затрат на последовательное вычисление определителя. С увеличением размеров увеличивается эффективность использования параллельных вычислений, причем чем больше количество процессов, тем позже появляется выигрыш, но тем более существенным он оказывается. Исключением является использование 24 потоков в связи с увеличением затрат на обслуживание потоков в ядрах по сравнению с 16 потоками. Таким образом, выигрыш для 4 и 8 потоков проявляется на матрицах, больших 6×6 и составляет от 1.2 до 1.7 раз и от 1.2 до 2.8 раз соответственно, для восьми потоков - на матрицах, больших 7×7, от 1.5 до 3.5 раз, для 16 и 24 потоков - на матрицах, больших 8×8, от 2.7 до 4.4 раз и от 2.3 до 4.28 раз соответственно. Наиболее эффективным для матриц, больших 8×8, является использование 16 потоков, для матриц 7×7 - 8 потоков, 6×6 - четырех.

Список литературы

Приложение 1. Результат работы алгоритма полного перебора и муравьиного алгоритма.

Матрица расстояний:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 3 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 3 \\ 4 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 3 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Результат работы алгоритма полного перебора:

Путь: 1 2 3 4 7 6 10 9 8 5 1

Длина: 10

Время работы: 25.2271

В листинге 1 выводится максимальное время коэффициент жадности коэффициент стадности коэффициент испарения феромона длина минимального пути путь. Длинной эталонного пути считается длина найденная алгоритмом полного перебора равная 10.

Приложение

Таблица 4.12: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
400	1	0	0.1	1322	3	351
400	1	0	0.2	1390	4	337
400	1	0	0.3	591	6	194
400	1	0	0.4	1662	3	248
400	1	0	0.5	1318	4	350
400	1	0	0.6	992	4	265
400	1	0	0.7	936	5	291
400	1	0	0.8	1118	3	243
400	1	0	0.9	1086	3	306

Таблица 4.3: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
50	0	1	0.1	346	3	115
50	0	1	0.2	294	3	57
50	0	1	0.3	518	3	48
50	0	1	0.4	709	3	179
50	0	1	0.5	283	1	86
50	0	1	0.6	40	3	186
50	0	1	0.7	684	1	55
50	0	1	0.8	546	2	184
50	0	1	0.9	306	4	88
50	0.25	0.75	0.1	1527	5	194
50	0.25	0.75	0.2	1399	5	315
50	0.25	0.75	0.3	822	5	370
50	0.25	0.75	0.4	1069	6	350
50	0.25	0.75	0.5	1193	3	351
50	0.25	0.75	0.6	984	6	310
50	0.25	0.75	0.7	1224	5	443
50	0.25	0.75	0.8	1546	4	486
50	0.25	0.75	0.9	767	0	355
50	0.5	0.5	0.1	1295	3	251
50	0.5	0.5	0.2	1426	2	354
50	0.5	0.5	0.3	892	5	90
50	0.5	0.5	0.4	323	4	370
50	0.5	0.5	0.5	923	5	392
50	0.5	0.5	0.6	989	4	446
50	0.5	0.5	0.7	1480	4	298
50	0.5	0.5	0.8	995	4	358
50	0.5	0.5	0.9	1467	4	388
50	0.75	0.25	0.1	840	3	327
50	0.75	0.25	0.2	1466	6	203
50	0.75	0.25	0.3	1513	2	408
50	0.75	0.25	0.4	1318	2	317
50	0.75	0.25	0.5	1533	3	344
50	0.75	0.25	0.6	760	6	315
50	0.75	0.25	0.7	1514	2	315
50	0.75	0.25	0.8	661	5	361
50	0.75	0.25	0.9	1309	4	275
50	1	0	0.1	1452	5	306
50	1	0	0.2	1326	4	209
50	1	0	0.3	1523	5	328

Таблица 4.4: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
50	1	0	0.4	1761	3	397
50	1	0	0.5	1897	5	283
50	1	0	0.6	1605	6	322
50	1	0	0.7	1833	3	322
50	1	0	0.8	764	5	399
50	1	0	0.9	1479	3	433
100	0	1	0.1	235	1	175
100	0	1	0.2	283	2	100
100	0	1	0.3	92	2	146
100	0	1	0.4	40	1	67
100	0	1	0.5	576	3	123
100	0	1	0.6	282	3	135
100	0	1	0.7	277	2	135
100	0	1	0.8	555	2	4
100	0	1	0.9	85	2	120
100	0.25	0.75	0.1	779	5	192
100	0.25	0.75	0.2	1124	6	320
100	0.25	0.75	0.3	1262	3	428
100	0.25	0.75	0.4	867	4	297
100	0.25	0.75	0.5	1890	3	153
100	0.25	0.75	0.6	1242	3	222
100	0.25	0.75	0.7	1532	5	424
100	0.25	0.75	0.8	521	5	268
100	0.25	0.75	0.9	1977	2	243
100	0.5	0.5	0.1	1905	3	260
100	0.5	0.5	0.2	1809	6	255
100	0.5	0.5	0.3	1233	4	457
100	0.5	0.5	0.4	1355	3	362
100	0.5	0.5	0.5	897	4	103
100	0.5	0.5	0.6	1135	4	227
100	0.5	0.5	0.7	1237	2	332
100	0.5	0.5	0.8	565	3	46
100	0.5	0.5	0.9	1934	3	168
100	0.75	0.25	0.1	1176	3	267
100	0.75	0.25	0.2	2140	5	384
100	0.75	0.25	0.3	1542	6	253
100	0.75	0.25	0.4	1200	4	163
100	0.75	0.25	0.5	1163	4	223
100	0.75	0.25	0.6	1743	4	452

Таблица 4.5: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
100	0.75	0.25	0.7	867	4	151
100	0.75	0.25	0.8	1268	5	338
100	0.75	0.25	0.9	1119	4	327
100	1	0	0.1	836	2	398
100	1	0	0.2	789	4	279
100	1	0	0.3	684	4	258
100	1	0	0.4	1494	5	438
100	1	0	0.5	1230	3	247
100	1	0	0.6	933	4	272
100	1	0	0.7	1089	3	328
100	1	0	0.8	1629	2	387
100	1	0	0.9	1041	3	376
150	0	1	0.1	120	3	248
150	0	1	0.2	529	2	235
150	0	1	0.3	592	1	208
150	0	1	0.4	282	3	142
150	0	1	0.5	297	2	68
150	0	1	0.6	379	5	47
150	0	1	0.7	488	4	49
150	0	1	0.8	282	2	123
150	0	1	0.9	502	1	201
150	0.25	0.75	0.1	899	5	371
150	0.25	0.75	0.2	1014	1	385
150	0.25	0.75	0.3	1775	5	197
150	0.25	0.75	0.4	1355	4	350
150	0.25	0.75	0.5	1403	5	335
150	0.25	0.75	0.6	516	3	347
150	0.25	0.75	0.7	1727	6	351
150	0.25	0.75	0.8	682	4	352
150	0.25	0.75	0.9	1197	4	432
150	0.5	0.5	0.1	887	7	254
150	0.5	0.5	0.2	1088	3	341
150	0.5	0.5	0.3	697	4	356
150	0.5	0.5	0.4	1401	6	243
150	0.5	0.5	0.5	921	5	333
150	0.5	0.5	0.6	1385	2	208
150	0.5	0.5	0.7	1281	6	254
150	0.5	0.5	0.8	1288	5	281
150	0.5	0.5	0.9	1029	3	318

Таблица 4.6: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
150	0.75	0.25	0.1	1382	4	399
150	0.75	0.25	0.2	1294	3	346
150	0.75	0.25	0.3	1359	3	176
150	0.75	0.25	0.4	1306	4	228
150	0.75	0.25	0.5	1716	4	417
150	0.75	0.25	0.6	1309	4	148
150	0.75	0.25	0.7	1002	4	478
150	0.75	0.25	0.8	1053	3	196
150	0.75	0.25	0.9	1292	5	397
150	1	0	0.1	1740	6	196
150	1	0	0.2	1074	5	455
150	1	0	0.3	1379	2	307
150	1	0	0.4	1350	0	371
150	1	0	0.5	1267	5	278
150	1	0	0.6	1796	3	321
150	1	0	0.7	1275	3	302
150	1	0	0.8	902	6	375
150	1	0	0.9	1421	4	239
200	0	1	0.1	413	2	303
200	0	1	0.2	573	0	30
200	0	1	0.3	661	3	17
200	0	1	0.4	624	2	130
200	0	1	0.5	678	2	152
200	0	1	0.6	578	3	37
200	0	1	0.7	510	1	102
200	0	1	0.8	389	3	164
200	0	1	0.9	521	2	215
200	0.25	0.75	0.1	1069	2	328
200	0.25	0.75	0.2	1137	5	388
200	0.25	0.75	0.3	1891	5	395
200	0.25	0.75	0.4	914	2	217
200	0.25	0.75	0.5	953	5	425
200	0.25	0.75	0.6	1361	4	267
200	0.25	0.75	0.7	1317	4	312
200	0.25	0.75	0.8	600	3	169
200	0.25	0.75	0.9	826	3	312
200	0.5	0.5	0.1	1116	4	303
200	0.5	0.5	0.2	1513	4	457
200	0.5	0.5	0.3	1230	3	307

Таблица 4.7: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
200	0.5	0.5	0.4	1501	6	352
200	0.5	0.5	0.5	1508	4	304
200	0.5	0.5	0.6	1397	3	307
200	0.5	0.5	0.7	1340	2	360
200	0.5	0.5	0.8	544	5	161
200	0.5	0.5	0.9	1647	4	386
200	0.75	0.25	0.1	1551	2	293
200	0.75	0.25	0.2	868	5	212
200	0.75	0.25	0.3	890	2	399
200	0.75	0.25	0.4	1044	5	427
200	0.75	0.25	0.5	1514	4	297
200	0.75	0.25	0.6	1134	2	298
200	0.75	0.25	0.7	1879	4	291
200	0.75	0.25	0.8	1397	5	296
200	0.75	0.25	0.9	908	3	341
200	1	0	0.1	962	6	435
200	1	0	0.2	1361	4	300
200	1	0	0.3	671	4	334
200	1	0	0.4	686	3	384
200	1	0	0.5	1341	4	298
200	1	0	0.6	822	3	271
200	1	0	0.7	869	5	307
200	1	0	0.8	969	5	247
200	1	0	0.9	1290	4	251
250	0	1	0.1	488	1	120
250	0	1	0.2	277	2	47
250	0	1	0.3	455	2	121
250	0	1	0.4	348	4	125
250	0	1	0.5	235	2	194
250	0	1	0.6	235	4	140
250	0	1	0.7	211	1	4
250	0	1	0.8	423	2	66
250	0	1	0.9	501	3	190
250	0.25	0.75	0.1	961	2	259
250	0.25	0.75	0.2	1346	3	375
250	0.25	0.75	0.3	1483	4	360
250	0.25	0.75	0.4	661	2	353
250	0.25	0.75	0.5	1477	2	257
250	0.25	0.75	0.6	865	4	412

Таблица 4.8: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
250	0.25	0.75	0.7	1631	4	363
250	0.25	0.75	0.8	1848	4	322
250	0.25	0.75	0.9	934	5	526
250	0.5	0.5	0.1	1271	4	116
250	0.5	0.5	0.2	765	4	260
250	0.5	0.5	0.3	1978	5	365
250	0.5	0.5	0.4	1420	4	260
250	0.5	0.5	0.5	1048	6	356
250	0.5	0.5	0.6	1719	4	393
250	0.5	0.5	0.7	1967	3	256
250	0.5	0.5	0.8	1543	3	195
250	0.5	0.5	0.9	1207	5	282
250	0.75	0.25	0.1	1484	2	240
250	0.75	0.25	0.2	1385	3	316
250	0.75	0.25	0.3	508	1	294
250	0.75	0.25	0.4	1774	2	358
250	0.75	0.25	0.5	888	5	232
250	0.75	0.25	0.6	1455	3	225
250	0.75	0.25	0.7	1189	5	375
250	0.75	0.25	0.8	1103	4	183
250	0.75	0.25	0.9	1042	3	355
250	1	0	0.1	1398	3	148
250	1	0	0.2	1666	4	202
250	1	0	0.3	1014	3	288
250	1	0	0.4	1083	4	128
250	1	0	0.5	1137	5	211
250	1	0	0.6	1708	4	238
250	1	0	0.7	1432	3	299
250	1	0	0.8	1254	3	428
250	1	0	0.9	1510	3	287
300	0	1	0.1	654	1	128
300	0	1	0.2	412	2	46
300	0	1	0.3	85	3	164
300	0	1	0.4	488	0	69
300	0	1	0.5	402	3	134
300	0	1	0.6	133	2	107
300	0	1	0.7	704	1	179
300	0	1	0.8	606	2	31
300	0	1	0.9	313	2	161

Таблица 4.9: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
300	0.25	0.75	0.1	1297	3	421
300	0.25	0.75	0.2	1577	6	305
300	0.25	0.75	0.3	902	3	453
300	0.25	0.75	0.4	1311	3	270
300	0.25	0.75	0.5	277	4	366
300	0.25	0.75	0.6	1689	5	333
300	0.25	0.75	0.7	234	5	15
300	0.25	0.75	0.8	1521	4	226
300	0.25	0.75	0.9	1223	4	340
300	0.5	0.5	0.1	1295	4	234
300	0.5	0.5	0.2	1857	3	365
300	0.5	0.5	0.3	1781	4	388
300	0.5	0.5	0.4	935	6	322
300	0.5	0.5	0.5	1003	4	395
300	0.5	0.5	0.6	1102	3	260
300	0.5	0.5	0.7	297	4	86
300	0.5	0.5	0.8	1524	4	425
300	0.5	0.5	0.9	1302	3	434
300	0.75	0.25	0.1	588	5	318
300	0.75	0.25	0.2	1552	5	445
300	0.75	0.25	0.3	1570	6	326
300	0.75	0.25	0.4	1307	3	309
300	0.75	0.25	0.5	1522	6	319
300	0.75	0.25	0.6	405	3	283
300	0.75	0.25	0.7	1047	5	401
300	0.75	0.25	0.8	1507	3	380
300	0.75	0.25	0.9	897	2	299
300	1	0	0.1	761	4	459
300	1	0	0.2	1419	5	230
300	1	0	0.3	1519	4	72
300	1	0	0.4	696	3	177
300	1	0	0.5	1423	5	289
300	1	0	0.6	1600	6	335
300	1	0	0.7	1043	4	280
300	1	0	0.8	1315	4	283
300	1	0	0.9	1005	4	407
350	0	1	0.1	726	3	170
350	0	1	0.2	339	2	113
350	0	1	0.3	322	1	74

Таблица 4.10: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
350	0	1	0.4	437	2	100
350	0	1	0.5	404	3	64
350	0	1	0.6	34	1	54
350	0	1	0.7	247	3	165
350	0	1	0.8	303	1	258
350	0	1	0.9	120	4	11
350	0.25	0.75	0.1	1354	5	197
350	0.25	0.75	0.2	1358	4	418
350	0.25	0.75	0.3	1784	3	244
350	0.25	0.75	0.4	1148	2	246
350	0.25	0.75	0.5	1600	4	311
350	0.25	0.75	0.6	1435	6	426
350	0.25	0.75	0.7	1519	6	247
350	0.25	0.75	0.8	1013	3	211
350	0.25	0.75	0.9	956	5	244
350	0.5	0.5	0.1	1154	4	300
350	0.5	0.5	0.2	1584	5	389
350	0.5	0.5	0.3	1711	4	408
350	0.5	0.5	0.4	912	4	216
350	0.5	0.5	0.5	1822	5	290
350	0.5	0.5	0.6	1314	4	219
350	0.5	0.5	0.7	1898	5	332
350	0.5	0.5	0.8	1112	2	392
350	0.5	0.5	0.9	1499	3	223
350	0.75	0.25	0.1	1715	3	249
350	0.75	0.25	0.2	1982	5	363
350	0.75	0.25	0.3	1564	3	295
350	0.75	0.25	0.4	1288	5	400
350	0.75	0.25	0.5	914	4	285
350	0.75	0.25	0.6	1040	2	275
350	0.75	0.25	0.7	1484	6	418
350	0.75	0.25	0.8	1100	2	492
350	0.75	0.25	0.9	1550	4	447
350	1	0	0.1	1712	5	314
350	1	0	0.2	769	3	404
350	1	0	0.3	2358	5	405
350	1	0	0.4	1531	6	345
350	1	0	0.5	1229	3	308
350	1	0	0.6	779	4	277

Таблица 4.11: Время (такт) выполнения полного перебора и муравьиного алгоритма

α	β	ρ	t_{max}	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3
350	1	0	0.7	1347	6	295
350	1	0	0.8	1350	1	331
350	1	0	0.9	1413	4	208
400	0	1	0.1	429	1	285
400	0	1	0.2	991	2	125
400	0	1	0.3	506	2	45
400	0	1	0.4	85	3	37
400	0	1	0.5	912	1	66
400	0	1	0.6	297	1	54
400	0	1	0.7	447	2	92
400	0	1	0.8	40	3	169
400	0	1	0.9	413	2	200
400	0.25	0.75	0.1	742	4	325
400	0.25	0.75	0.2	1924	2	347
400	0.25	0.75	0.3	578	4	368
400	0.25	0.75	0.4	1746	3	223
400	0.25	0.75	0.5	1306	2	365
400	0.25	0.75	0.6	802	4	192
400	0.25	0.75	0.7	965	4	309
400	0.25	0.75	0.8	1447	7	320
400	0.25	0.75	0.9	644	5	311
400	0.5	0.5	0.1	952	5	464
400	0.5	0.5	0.2	1177	3	163
400	0.5	0.5	0.3	797	5	386
400	0.5	0.5	0.4	929	5	316
400	0.5	0.5	0.5	1594	4	296
400	0.5	0.5	0.6	1156	6	425
400	0.5	0.5	0.7	1049	5	443
400	0.5	0.5	0.8	1632	4	237
400	0.5	0.5	0.9	1409	2	288
400	0.75	0.25	0.1	978	5	416
400	0.75	0.25	0.2	2069	2	370
400	0.75	0.25	0.3	1290	5	88
400	0.75	0.25	0.4	1160	5	385
400	0.75	0.25	0.5	1777	5	277
400	0.75	0.25	0.6	1253	5	386
400	0.75	0.25	0.7	1327	4	392
400	0.75	0.25	0.8	878	5	88
400	0.75	0.25	0.9	1372	4	315