

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Вычислительная техника»

## **ОТЧЕТ**

по лабораторной работе №9

по дисциплине: "Логика и основы алгоритмизации в инженерных задачах"  
на тему: "Поиск расстояний в графе"

Выполнили студенты группы  
24БВВ3:

Пяткин Р. С.  
Гусаров Е. Е.

Принял:

к.т.н., доцент, Юрова О. В.  
к.т.н., Деев М. В.

Пенза 2025

## **Цель**

Изучение поиска расстояний в графе.

## **Лабораторное задание**

### **Задание 1**

1. Сгенерируйте (используя генератор случайных чисел) матрицу смежности для неориентированного графа  $G$ . Выведите матрицу на экран.
2. Для сгенерированного графа осуществите процедуру поиска расстояний, реализованную в соответствии с приведенным выше описанием. При реализации алгоритма в качестве очереди используйте класс `queue` из стандартной библиотеки C++.
3. \* Реализуйте процедуру поиска расстояний для графа, представленного списками смежности.

### **Задание 2 \***

Реализуйте процедуру поиска расстояний на основе обхода в глубину.

Реализуйте процедуру поиска расстояний на основе обхода в глубину для графа, представленного списками смежности.

Оцените время работы реализаций алгоритмов поиска расстояний на основе обхода в глубину и обхода в ширину для графов разных порядков.

## **Теория**

Поиск расстояний – довольно распространенная задача анализа графов.

Для поиска расстояний можно использовать процедуры обхода графа. Для этого при каждом переходе в новую вершину необходимо запоминать,

сколько шагов до нее мы сделали. При этом вектор, который хранил информацию о посещении вершин становится вектором расстояний. Довольно просто модернизировать для поиска расстояний в графе алгоритм обхода в ширину, т.к. этот алгоритм проходит вершины по уровням удаленности, то для не ориентированного графа для вершин каждого следующего уровня глубины расстояние от исходной вершины увеличивается на 1. Удалённость в данном случае понимается как количество ребер, по которым необходимо пройти до достижения вершины.

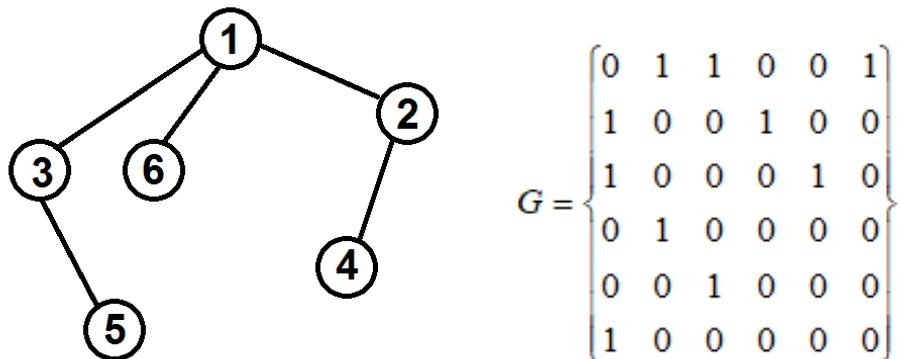


Рисунок 1 – Граф

Таким образом, можно предложить следующую реализацию алгоритма обхода в ширину.

## Реализация

Вход: G – матрица смежности графа.

- 1.1. для всех i положим DIST [i] = -1 пометим как "не посещенную";
- 1.2. ВЫПОЛНЯТЬ BFSD (v).
- 1.3 для всех i вывести DIST [i] на экран;

Алгоритм BFSD(v):

- 2.1. Создать пустую очередь Q = {};
- 2.2. Поместить v в очередь Q.push(v);
- 2.3. Обновить вектор расстояний DIST [ x ] = 0;
- 2.4. ПОКА Q != ∅ очередь не пуста ВЫПОЛНЯТЬ

- 2.5.  $v = Q.front()$  установить текущую вершину;
- 2.6. Удалить первый элемент из очереди  $Q.pop()$ ;
- 2.7. вывести на экран  $v$ ;
- 2.8. ДЛЯ  $i = 1$  ДО  $size\_G$  ВЫПОЛНЯТЬ
- 2.9. ЕСЛИ  $G(v,i) == 1$  И  $DIST[i] == -1$
- 2.10.       ТО
- 2.11.           Поместить  $i$  в очередь  $Q.push(i)$ ;
- 2.12.           Обновить вектор расстояний  $DIST[i] = DIST[v] + 1$ ;

Реализация состоит из подготовительной части, в которой все вершины помечаются как не посещенные (п.1.1). В отличие от алгоритма BFS не посещенные вершины помечаем  $-1$ , т.к. значение  $0$  и  $1$  могут быть расстояниями. Расстояние  $0$  – от исходной вершины до самой себя.

В самой процедуре как и в алгоритме BFS сначала создается пустая очередь (п. 2.1), в которую помещается исходная вершина, из которой начат обход (п.2.2). Расстояние до этой вершины (п.2.3) устанавливается равным  $0$  (расстояние до самой себя).

Далее итерационно, пока очередь не опустеет, из нее извлекается первый элемент, который становится текущей вершиной (п. 2.5, 2.6). Затем в цикле просматривается  $v$ -я строка матрицы смежности графа  $G(v,i)$ . Как только алгоритм встречает смежную с  $v$  не посещенную вершину (п.2.9), эта вершина помещается в очередь (п.2.11) и для нее обновляется вектор расстояния (п.2.12). Расстояние до новой  $i$ -й вершины вычисляется как расстояние до текущей  $v$ -й вершины плюс 1 (так как ребра нашего графа не взвешенные).

После просмотра строки матрицы смежности алгоритм делает следующую итерацию цикла 2.4 или заканчивает работу, если очередь пуста.

Таким образом, если вершина помещается в очередь при просмотре строки матрицы смежности на 1-й итерации, то они находятся на 1 уровне удаленности и расстояние до этих вершин будет равным 1.

$DIST[i] = DIST[v] + 1$ , где  $DIST[v] = 0$  – расстояние от исходной вершины до самой себя.

Далее, начинают просматриваться вершины первого уровня и соответствующие им строки матрицы смежности. При добавлении смежных с вершинами первого уровня вершин, расстояния до них будут равны 2.

$DIST [ i ] = DIST [ v ] + 1$ , где  $DIST [ v ] = 1$  – расстояние от исходной вершины до вершин 1 уровня.

После того, как все вершины первого уровня будут просмотрены и извлечены из очереди, начнется просмотр вершин 2 уровня и соответствующих им строк матрицы смежности. При добавлении смежных с вершинами второго уровня вершин, расстояния до них будут равны 3.

$DIST [ i ] = DIST [ v ] + 1$ , где  $DIST [ v ] = 2$  – расстояние от исходной вершины до вершин 2 уровня.

И так далее, алгоритм проходит вершины по уровням, пока очередь не опустеет.

### **Вывод:**

В ходе выполнения лабораторной работы были разработаны программа для выполнения заданий Лабораторной работы №9. В процессе выполнения работы был изучен поиск расстояний в графе.

### **Листинг**

#### **Файл lab\_9.cpp**

```
#include <iostream>
#include <ctime>
#include <random>
#include <queue>

using namespace std;

int printMatrix(int** m, int n){
    cout << " ";
    for(int i = 0; i < n; i++){
        cout << i << " ";
    }
    cout << endl;
    for(int i = 0; i < n; i++){
        cout << i << "| ";
        for(int j = 0; j < n; j++){
            cout << m[i][j] << " ";
        }
        cout << endl;
    }
}
```

```

    }
    cout << endl;
    return 0;
}
int** createMatrix(int n){
int** m = new int*[n];
for (int i = 0; i < n; i++) {
m[i] = new int[n];
}

for(int i = 0; i < n; i++){
for(int j = i; j < n; j++){
m[i][j] = m[j][i] = (i == j ? 0 : rand() % 2);
}
}
return m;
}
void deleteM(int** m, int n, int* v) {
for (int i = 0; i < n; ++i) {
delete[] m[i];
}
delete[] m;
delete[] v;
}

void BFSD(int** G, int numG, int* distance, int s) {
queue<int> q;
int v = 0;
distance[s] = 0;
q.push(s);

while (!q.empty())
{
v = q.front();
q.pop();
cout<<v;

for(int i = 0; i < numG; i++){
if(G[v][i] == 1 && distance[i] == -1){
q.push(i);
distance[i] = distance[v] + 1;
}
}
}
cout<<endl;
cout<<"Distance from "<<s<<" to: "<<endl;

for(int i = 0; i < numG; i++){
cout<<i<<" : "<<distance[i]<<endl;
}
}

```

```

int main() {
    srand(time(0));
    int numG = 0;
    int n = 0;
    cout << "Введите количество вершин в графе: ";
    cin >> numG;
    if (numG <= 0) {
        cout << "Ошибка: количество вершин должно быть положительным!" << endl;
        return 1;
    }
    int* distance = new int[numG];
    for(int i = 0; i < numG; i++){
        distance[i] = -1;
    }

    int** G = createMatrix(numG);

    cout << "Матрица смежности графа:" << endl;
    printMatrix(G, numG);

    cout << "Введите начальную вершину обхода: ";
    cin >> n;
    BFSD(G, numG, distance, n);
    cout << endl;
    deleteM(G, numG, distance);
    return 0;
}

```

### **Файл lab\_9\_2.cpp**

```

#include <iostream>
#include <ctime>
#include <random>
#include <queue>

using namespace std;

struct ListNode {
    int vertex;
    ListNode* next;
    ListNode(int v) : vertex(v), next(nullptr) {}
};

struct AdjacencyList {
    ListNode* head;
    int size;
    AdjacencyList() : head(nullptr), size(0) {}
    void add(int v) {
        ListNode* newNode = new ListNode(v);
        newNode->next = head;
        head = newNode;
    }
};

```

```

head = newNode;
size++;
}
bool contains(int v) {
ListNode* current = head;
while (current != nullptr) {
if (current->vertex == v) {
return true;
}
current = current->next;
}
return false;
}
~AdjacencyList() {
ListNode* current = head;
while (current != nullptr) {
ListNode* next = current->next;
delete current;
current = next;
}
head = nullptr;
size = 0;
}
};

void printAdjacencyLists(AdjacencyList* graph, int n) {
cout << "Списки смежности графа:" << endl;
for (int i = 0; i < n; i++) {
cout << "Вершина " << i << ":" ;
ListNode* current = graph[i].head;
while (current != nullptr) {
cout << current->vertex << " ";
current = current->next;
}
cout << endl;
}
cout << endl;
}

AdjacencyList* createGraph(int n) {
AdjacencyList* graph = new AdjacencyList[n];
for (int i = 0; i < n; i++) {
for (int j = i + 1; j < n; j++) {
if (rand() % 2 == 1) {
graph[i].add(j);
graph[j].add(i);
}
}
}
return graph;
}

```

```

void deleteGraph(AdjacencyList* graph, int n, int* distance) {
    delete[] graph;
    delete[] distance;
}

void BFD(AdjacencyList* graph, int numG, int* distance, int s) {
    queue<int> q;
    int v = 0;
    distance[s] = 0;
    q.push(s);

    while (!q.empty()) {
        v = q.front();
        q.pop();
        cout << v << " ";

        ListNode* current = graph[v].head;
        while (current != nullptr) {
            int neighbor = current->vertex;
            if (distance[neighbor] == -1) {
                q.push(neighbor);
                distance[neighbor] = distance[v] + 1;
            }
            current = current->next;
        }
    }
    cout << endl << "Расстояния от вершины " << s << " до:" << endl;
    for (int i = 0; i < numG; i++) {
        cout << "Вершина " << i << ":" << distance[i] << endl;
    }
}

int main() {
    srand(time(0));
    int numG = 0;
    int startVertex = 0;
    cout << "Введите количество вершин в графе: ";
    cin >> numG;
    if (numG <= 0) {
        cout << "Ошибка: количество вершин должно быть положительным!" << endl;
        return 1;
    }
    int* distance = new int[numG];
    for (int i = 0; i < numG; i++) {
        distance[i] = -1;
    }

    AdjacencyList* graph = createGraph(numG);

    printAdjacencyLists(graph, numG);
}

```

```

cout << "Введите начальную вершину обхода: ";
cin >> startVertex;
if (startVertex < 0 || startVertex >= numG) {
    cout << "Ошибка: неверный номер вершины!" << endl;
    deleteGraph(graph, numG, distance);
    return 1;
}
BFSD(graph, numG, distance, startVertex);
cout << endl;
deleteGraph(graph, numG, distance);
return 0;
}

```

### **Файл lab\_9\_3\_1.cpp**

```

#include <iostream>
#include <ctime>
#include <random>

using namespace std;

int printMatrix(int** m, int n){
    cout << " ";
    for(int i = 0; i < n; i++){
        cout << i << " ";
    }
    cout << endl;
    for(int i = 0; i < n; i++){
        cout << i << "| ";
        for(int j = 0; j < n; j++){
            cout << m[i][j] << " ";
        }
        cout << endl;
    }
    cout << endl;
    return 0;
}

int** createMatrix(int n){
    int** m = new int*[n];
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        m[i] = new int[n];
    }

    for(int i = 0; i < n; i++){
        for(int j = i; j < n; j++){
            m[i][j] = m[j][i] = (i == j ? 0 : rand() % 2);
        }
    }
    return m;
}

```

```

}

void deleteM(int** m, int n, int* v) {
    for (int i = 0; i < n; ++i) {
        delete[] m[i];
    }
    delete[] m;
    if (v != nullptr) {
        delete[] v;
    }
}

void DFSD(int** G, int numG, int* visited, int* distance, int current, int currentDistance) {
    visited[current] = 1;
    distance[current] = currentDistance;
    cout << current << " ";
    for(int i = 0; i < numG; i++){
        if(G[current][i] == 1 && visited[i] == 0){
            DFSD(G, numG, visited, distance, i, currentDistance + 1);
        }
    }
}

void DFSDistance(int** G, int numG, int startVertex) {
    int* visited = new int[numG];
    int* distance = new int[numG];
    for(int i = 0; i < numG; i++){
        visited[i] = 0;
        distance[i] = -1;
    }
    DFSD(G, numG, visited, distance, startVertex, 0);
    cout << endl;
    cout << "Расстояния от вершины " << startVertex << " до:" << endl;
    for(int i = 0; i < numG; i++){
        if(distance[i] != -1) {
            cout << "Вершина " << i << ":" << distance[i] << endl;
        } else {
            cout << "Вершина " << i << ": недостижима" << endl;
        }
    }
    delete[] visited;
    delete[] distance;
}

int main(){
    srand(time(0));
    int numG, current = 0;
    cout << "Введите количество вершин в графе: ";
    cin >> numG;
    if (numG <= 0) {
        cout << "Ошибка: количество вершин должно быть положительным!" << endl;
    }
}

```

```

return 1;
}

int** G = createMatrix(numG);
printMatrix(G, numG);

cout << "Введите начальную вершину обхода: ";
cin >> current;
if (current < 0 || current >= numG) {
    cout << "Ошибка: неверный номер вершины!" << endl;
    deleteM(G, numG, nullptr);
    return 1;
}
DFSDistance(G, numG, current);
deleteM(G, numG, nullptr);
return 0;
}

```

## **Файл lab\_9\_3\_2.cpp**

```

#include <iostream>
#include <ctime>
#include <random>

using namespace std;

struct ListNode {
    int vertex;
    ListNode* next;
    ListNode(int v) : vertex(v), next(nullptr) {}
};

struct AdjacencyList {
    ListNode* head;
    int size;
    AdjacencyList() : head(nullptr), size(0) {}
    void add(int v) {
        ListNode* newNode = new ListNode(v);
        newNode->next = head;
        head = newNode;
        size++;
    }
    bool contains(int v) {
        ListNode* current = head;
        while (current != nullptr) {
            if (current->vertex == v) {
                return true;
            }
            current = current->next;
        }
        return false;
    }
};

```

```

}

~AdjacencyList() {
    ListNode* current = head;
    while (current != nullptr) {
        ListNode* next = current->next;
        delete current;
        current = next;
    }
    head = nullptr;
    size = 0;
}

void printAdjacencyLists(AdjacencyList* graph, int n) {
    cout << "Списки смежности графа:" << endl;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        cout << "Вершина " << i << ":" ;
        ListNode* current = graph[i].head;
        while (current != nullptr) {
            cout << current->vertex << " ";
            current = current->next;
        }
        cout << endl;
    }
    cout << endl;
}

AdjacencyList* createGraph(int n) {
    AdjacencyList* graph = new AdjacencyList[n];
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = i + 1; j < n; j++) {
            if (rand() % 2 == 1) {
                graph[i].add(j);
                graph[j].add(i);
            }
        }
    }
    return graph;
}

// Удаление графа
void deleteGraph(AdjacencyList* graph, int n, int* distance, int* visited) {
    delete[] graph;
    delete[] distance;
    if (visited != nullptr) {
        delete[] visited;
    }
}

void DFSDRecursive(AdjacencyList* graph, int numG, int* visited, int* distance,
    int current, int currentDistance) {

```

```

visited[current] = 1;
distance[current] = currentDistance;
cout << current << " ";
ListNode* neighbor = graph[current].head;
while (neighbor != nullptr) {
    int neighborVertex = neighbor->vertex;
    if (visited[neighborVertex] == 0) {
        DFSDRecursive(graph, numG, visited, distance,
                      neighborVertex, currentDistance + 1);
    }
    neighbor = neighbor->next;
}
}

void DFSDistance(AdjacencyList* graph, int numG, int startVertex) {
int* visited = new int[numG];
int* distance = new int[numG];
for (int i = 0; i < numG; i++) {
    visited[i] = 0;
    distance[i] = -1;
}
DFSDRecursive(graph, numG, visited, distance, startVertex, 0);
cout << endl;
cout << "Расстояния от вершины " << startVertex << " до:" << endl;
for (int i = 0; i < numG; i++) {
    if (distance[i] != -1) {
        cout << "Вершина " << i << ":" << distance[i] << endl;
    } else {
        cout << "Вершина " << i << ": недостижима" << endl;
    }
}
delete[] visited;
delete[] distance;
}

int main() {
srand(time(0));
int numG = 0;
int startVertex = 0;
cout << "Введите количество вершин в графе: ";
cin >> numG;
if (numG <= 0) {
    cout << "Ошибка: количество вершин должно быть положительным!" << endl;
    return 1;
}

AdjacencyList* graph = createGraph(numG);
printAdjacencyLists(graph, numG);

cout << "Введите начальную вершину обхода: ";
cin >> startVertex;

```

```

if (startVertex < 0 || startVertex >= numG) {
    cout << "Ошибка: неверный номер вершины!" << endl;
    deleteGraph(graph, numG, nullptr, nullptr);
    return 1;
}
DFSDistance(graph, numG, startVertex);
deleteGraph(graph, numG, nullptr, nullptr);
return 0;
}

```

### **Файл lab\_9\_3\_3.cpp**

```

#include <iostream>
#include <ctime>
#include <random>
#include <queue>
#include <chrono>
#include <iomanip>
#include <vector>

using namespace std;
using namespace chrono;

struct ListNode {
    int vertex;
    ListNode* next;
    ListNode(int v) : vertex(v), next(nullptr) {}
};

struct AdjacencyList {
    ListNode* head;
    int size;
    AdjacencyList() : head(nullptr), size(0) {}
    void add(int v) {
        ListNode* newNode = new ListNode(v);
        newNode->next = head;
        head = newNode;
        size++;
    }
    ~AdjacencyList() {
        ListNode* current = head;
        while (current != nullptr) {
            ListNode* next = current->next;
            delete current;
            current = next;
        }
        head = nullptr;
        size = 0;
    };
};

```

```

AdjacencyList* createGraph(int n) {
    AdjacencyList* graph = new AdjacencyList[n];
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = i + 1; j < n; j++) {
            if (rand() % 2 == 1) {
                graph[i].add(j);
                graph[j].add(i);
            }
        }
    }
    return graph;
}

void deleteGraph(AdjacencyList* graph, int n) {
    delete[] graph;
}

void DFSDRecursive(AdjacencyList* graph, int numG, int* visited, int* distance, int current, int
currentDistance) {
    visited[current] = 1;
    distance[current] = currentDistance;
    ListNode* neighbor = graph[current].head;
    while (neighbor != nullptr) {
        int neighborVertex = neighbor->vertex;
        if (visited[neighborVertex] == 0) {
            DFSDRecursive(graph, numG, visited, distance, neighborVertex, currentDistance + 1);
        }
        neighbor = neighbor->next;
    }
}

void DFSDistance(AdjacencyList* graph, int numG, int startVertex, int* distance) {
    int* visited = new int[numG];
    for (int i = 0; i < numG; i++) {
        visited[i] = 0;
        distance[i] = -1;
    }
    DFSDRecursive(graph, numG, visited, distance, startVertex, 0);
    delete[] visited;
}

void BFSD(AdjacencyList* graph, int numG, int startVertex, int* distance) {
    queue<int> q;
    for (int i = 0; i < numG; i++) {
        distance[i] = -1;
    }
    distance[startVertex] = 0;
    q.push(startVertex);

    while (!q.empty()) {
        int v = q.front();

```

```

q.pop();

ListNode* current = graph[v].head;
while (current != nullptr) {
    int neighbor = current->vertex;
    if (distance[neighbor] == -1) {
        q.push(neighbor);
        distance[neighbor] = distance[v] + 1;
    }
    current = current->next;
}
}

struct TestResult {
int vertices;
string algorithm;
long long timeMicroseconds;
double timeMilliseconds;
};

TestResult runTest(AdjacencyList* graph, int numVertices, int startVertex,
const string& algorithm, int* distDFS, int* distBFS) {
TestResult result;
result.vertices = numVertices;
result.algorithm = algorithm;
auto start = high_resolution_clock::now();
if (algorithm == "DFS") {
    DFSDistance(graph, numVertices, startVertex, distDFS);
} else {
    BFSD(graph, numVertices, startVertex, distBFS);
}
auto end = high_resolution_clock::now();
auto duration = duration_cast<microseconds>(end - start);
result.timeMicroseconds = duration.count();
result.timeMilliseconds = duration.count() / 1000.0;
return result;
}

void printTable(const vector<TestResult>& results) {
cout << "====="
endl;
cout << "СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ DFS И BFS" << endl;
cout << "====="
endl;
cout << left << setw(12) << "Вершин "
<< left << setw(12) << "Алгоритм "
<< left << setw(20) << "Время (микросек)"
<< left << setw(20) << "Время (миллисек)" << endl;
cout << "-----" << endl;
for (const auto& result : results) {

```

```

cout << left << setw(12) << result.vertices
<< left << setw(12) << result.algorithm
<< left << setw(20) << result.timeMicroseconds
<< fixed << setprecision(3) << left << setw(20) << result.timeMilliseconds << endl;
}
cout << "====="
endl;
}

void printComparison(const vector<TestResult>& results) {
cout << "\n===="
endl;
cout << "СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ" << endl;
cout << "===="
endl;
cout << left << setw(12) << " Вершин "
<< left << setw(15) << " Быстрее "
<< left << setw(20) << " Разница (микросек) "
<< left << setw(15) << " Выигрыш (%) " << endl;
cout << "-----" << endl;
for (int i = 0; i < results.size(); i += 2) {
if (i + 1 < results.size()) {
const TestResult& dfs = results[i];
const TestResult& bfs = results[i + 1];
string faster;
long long diff;
double percentage;
if (dfs.timeMicroseconds < bfs.timeMicroseconds) {
faster = "DFS";
diff = bfs.timeMicroseconds - dfs.timeMicroseconds;
percentage = (double)diff / bfs.timeMicroseconds * 100;
} else {
faster = "BFS";
diff = dfs.timeMicroseconds - bfs.timeMicroseconds;
percentage = (double)diff / dfs.timeMicroseconds * 100;
}
cout << left << setw(12) << dfs.vertices
<< left << setw(15) << faster
<< left << setw(20) << diff
<< fixed << setprecision(2) << left << setw(15) << percentage << "%" << endl;
}
}
cout << "===="
endl;
}

int main() {
srand(time(0));
vector<int> graphSizes = {100, 400, 800, 2000, 5000, 10000};
const int startVertex = 0;
vector<TestResult> allResults;

```

```

cout << "Запуск тестов производительности..." << endl;
cout << "Размеры графов: ";
for (int size : graphSizes) {
    cout << size << " ";
}
cout << "\n\n";
for (int numVertices : graphSizes) {
    cout << "Тестирование графа с " << numVertices << " вершинами..." << endl;
    AdjacencyList* graph = createGraph(numVertices);
    int* distDFS = new int[numVertices];
    int* distBFS = new int[numVertices];
    TestResult dfsResult = runTest(graph, numVertices, startVertex, "DFS", distDFS, distBFS);
    allResults.push_back(dfsResult);
    TestResult bfsResult = runTest(graph, numVertices, startVertex, "BFS", distDFS, distBFS);
    allResults.push_back(bfsResult);
    bool resultsMatch = true;
    for (int i = 0; i < numVertices; i++) {
        if (distDFS[i] != distBFS[i]) {
            resultsMatch = false;
            break;
        }
    }
    if (!resultsMatch) {
        cout << " ВНИМАНИЕ: результаты DFS и BFS не совпадают!" << endl;
    } else {
        cout << " ✓ Результаты DFS и BFS совпадают" << endl;
    }
    int totalEdges = 0;
    for (int i = 0; i < numVertices; i++) {
        ListNode* current = graph[i].head;
        while (current != nullptr) {
            totalEdges++;
            current = current->next;
        }
    }
    totalEdges /= 2;
    cout << " Ребра: " << totalEdges
    << ", Плотность: " << fixed << setprecision(2)
    << (2.0 * totalEdges) / (numVertices * (numVertices - 1)) * 100 << "%" << endl;
    delete[] distDFS;
    delete[] distBFS;
    deleteGraph(graph, numVertices);
    cout << endl;
}
printTable(allResults);
printComparison(allResults);
cout << "\n====="
endl;
cout << "СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ" << endl;
cout << "====="
endl;

```

```
double totalDFSTime = 0;
double totalBFSTime = 0;
int dfsWins = 0;
int bfsWins = 0;
for (int i = 0; i < allResults.size(); i += 2) {
    if (i + 1 < allResults.size()) {
        const TestResult& dfs = allResults[i];
        const TestResult& bfs = allResults[i + 1];
        totalDFSTime += dfs.timeMilliseconds;
        totalBFSTime += bfs.timeMilliseconds;
        if (dfs.timeMicroseconds < bfs.timeMicroseconds) {
            dfsWins++;
        } else {
            bfsWins++;
        }
    }
}
cout << "Среднее время DFS: " << fixed << setprecision(3)
<< totalDFSTime / (allResults.size() / 2) << " мс" << endl;
cout << "Среднее время BFS: " << totalBFSTime / (allResults.size() / 2) << " мс" << endl;
cout << "DFS был быстрее в " << dfsWins << " из " << (allResults.size() / 2) << " тестов" << endl;
cout << "BFS был быстрее в " << bfsWins << " из " << (allResults.size() / 2) << " тестов" << endl;
return 0;
}
```