МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**"Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет)**

**Факультет Вычислительной математики и информатики Кафедра экономико-математических методов статистики**

**ОТЧЕТ** **по дисциплине «Теория конечных графов и ее приложения»**

Выполнил:

студент группы ВМИ-302 Е.К. Редькин

Проверил:

к.ф.-м.н., доцент В.А. Голодов

Челябинск-2016

**Оглавление**

1. Практическая работа 1: Разработка класса Graph 3

1.1. Представление графа матрицей смежности 3

1.1.1. Описание входного файла 3

1.1.2. Описание структуры данных 4

1.2. Представление графа списком смежности 4

1.2.1. Описание входного файла 4

1.2.2. Описание структуры данных 4

1.3. Представление графа списком ребер 4

1.3.1. Описание входного файла 4

1.3.2. Описание структуры данных 4

1.4. Интерфейс класса Graph 5

2. Практическая работа 2: Остовное дерево минимального веса 6

2.1. Алгоритм Прима 6

2.2. Алгоритм Краскала 6

2.3. Алгоритм Борувки 7

2.4. Интерфейс класса Graph 7

2.5. Интерфейс класса DSU 8

3. Практическая работа 3: Поиск Эйлерова пути (цикла) 9

3.1. Проверка существования Эйлерова пути или цикла в графе 9

3.2. Алгоритм Флери 8

3.3. Эффективный алгоритм построения Эйлерова пути 9

3.4. Интерфейс класса Graph 11

4. Практическая работа 4: Максимальное паросочетание 12

4.1. Проверка графа на двудольность 12

4.2. Алгоритм Куна 12

4.3. Интерфейс класса Graph 13

5. Практическая работа 5: Потоки в сетях 14

5.1. Алгоритм Форда-Фалкерсона 14

5.2. Алгоритм Диница 15

5.3. Интерфейс класса Graph 16

6. Выводы по работе 16

**1. Практическая работа 1: Разработка класса Graph**

Требуется реализовать класс, моделирующий граф, заданный матрицей смежности, списком смежности, или списком ребер. Класс должен иметь следующую функциональность:

— Ввод/вывод из файла

— Добавление/удаление ребра графа

— Изменение веса ребра графа

— Преобразование одного представления в другое

Все вершины графа пронумерованы натуральными числами от 1 до N.

**1.1. Представление графа матрицей смежности**

1. **Описание входного файла** 
   * первой строке тестового файла представлены: символ *«C»* — индикатор представления матрицей смежности и число *«N»* — количество вершин графа. Во второй строке файла записаны числа «*D*, *W»* — индикаторы ориентированности и взвешенности графа. Далее следует *N* строк по *N* чисел каждая, числа в которой разделены пробелом, где число на пересечении строки *i* и столбца *j* описывает ребро *i → j*.
2. **Описание структуры данных**

Для хранения матрицы смежности было решено использовать следующую структуру: *std::vector<std::vector<int>>* — вектор векторов для хранения ребер и весов будущего представления графа. Этот способ позволяет выделить необходимое количество памяти, которая будет использоваться для представления графа.

**1.2. Представление графа списком смежности**

1. **Описание входного файла**

В первой строке файла записаны символ *«L»* — индикатор представления списком смежности и число *«N»* — количество вершин графа. Во второй строке записаны числа *«D, W»* — индикаторы ориентированности и взвешенности графа. Далее следует N — строк чисел *bi* (для невзвешенного графа) или пар *bi, wi* (для взвешенного графа), разделенных пробелом. Каждая строка описывает соседей очередной вершины, строка файла с номером *i + 2* описывает связи вершины *i*.

**1.2.2. Описание структуры данных**

Для хранения матрицы смежности используется тип данных *std::vector<std::map<int, int>>*, что позволяет осуществлять вставку, поиск, изменение и удаление за время, пропорциональное логарифму от числа элементов списка смежных вершин.

**1.3. Представление графа списком ребер**

1. **Описание входного файла**

В первой строке файла записаны символ «E» — индикатор представления списком смежности, число «N» — количество вершин графа и число «M» — количество ребер графа. Во второй строке записаны числа «D, W» — индикаторы ориентированности и взвешенности графа. Далее следует «M» — строк пар *ai, bi* (для невзвешенного графа) или троек *ai, bi, wi* (для взвешенного графа), разделенных пробелом.

1. **Описание структуры данных**

Для хранения матрицы смежности используется тип данных *std::vector<std::tuple<int, int, int>>*, что позволяет выделять ровно столько памяти. сколько нужно для представления графа.

**1.4. Интерфейс класса Graph**

Публичные методы:

* *void GraphFromFile(char\*);* — инициализация графа из файла;
* *void GraphToFile(string);* — сохранить граф в файл;

— *void AdjMatrix(char\*);* — сохранить матрицу смежности в указанный файл;

— *void ListOfNighbors(char\*);* — сохранить список смежных вершин в указанный файл;

— *void ListOfEdges(char\*);* — сохранить список ребер в указанный файл;

— *void AddEdge(vector<int>);* — добавить ребро (если уже есть, то обновить вес ребра);

— *void RemEdge(int x, int y);* — удалить ребро между вершинами x и y;

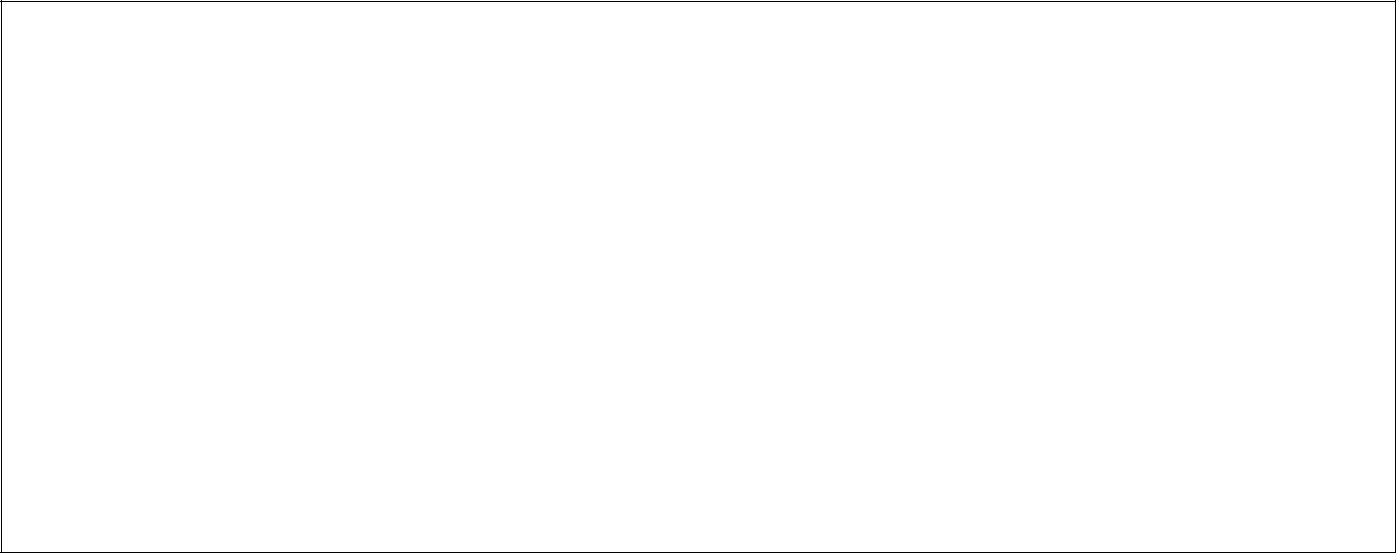
— *void EditEdge(vector<int>);* — редактировать ребро (если ребро отсутствует, то оно будет создано);

**2. Практическая работа №2**

Требуется обеспечить нахождение остовного леса оптимального веса для взвешенного неориентированного графа с помощью алгоритмов Прима, Краскала и Борувки.

**2.1. Алгоритм Прима**

На вход алгоритма подается связный неориентированный граф. Для каждого ребра задается его стоимость.



PRIM\_MST:

result = Graph(graph.V.size) fill(keys, INF) fill(parents, -1)

keys[0] = 0

queue = min\_priority\_queue(graph.V, keys) while not queue.empty

v = queue.pop()

if parent[v] != -1

result.add(v, parents[v], keys[v]) for vu in graph.E

if u in queue and vu.weight< keys[u] parents[u] = v

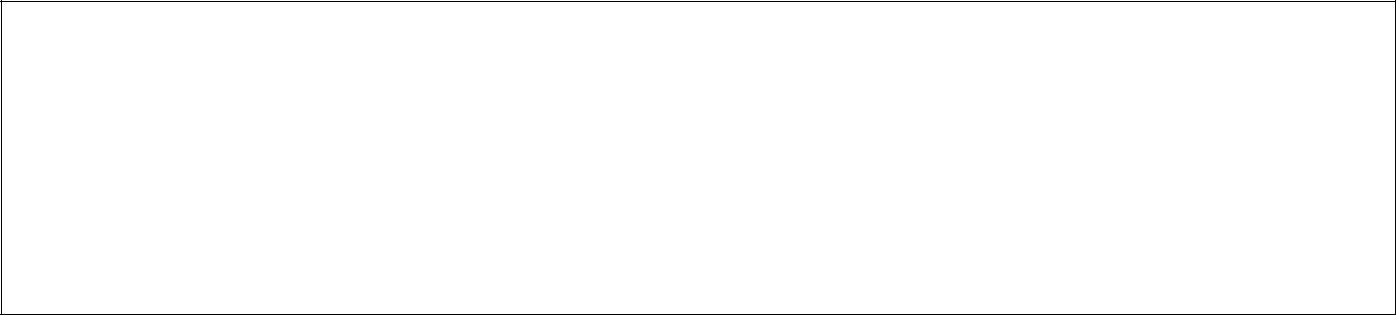
keys[u] = vu.weight queue.push(u, keys[u])

return result

*Рис. 1. Листинг псевдокода алгоритма Прима*

**2.2. Алгоритм Краскала**

На вход алгоритма подается связный неориентированный граф. Для каждого ребра задается его стоимость.



KRUSCAL\_MST:

result = Graph(graph.V.size) dsu = DSU(graph.V.size) graph.E.sort()

for vu in graph.E

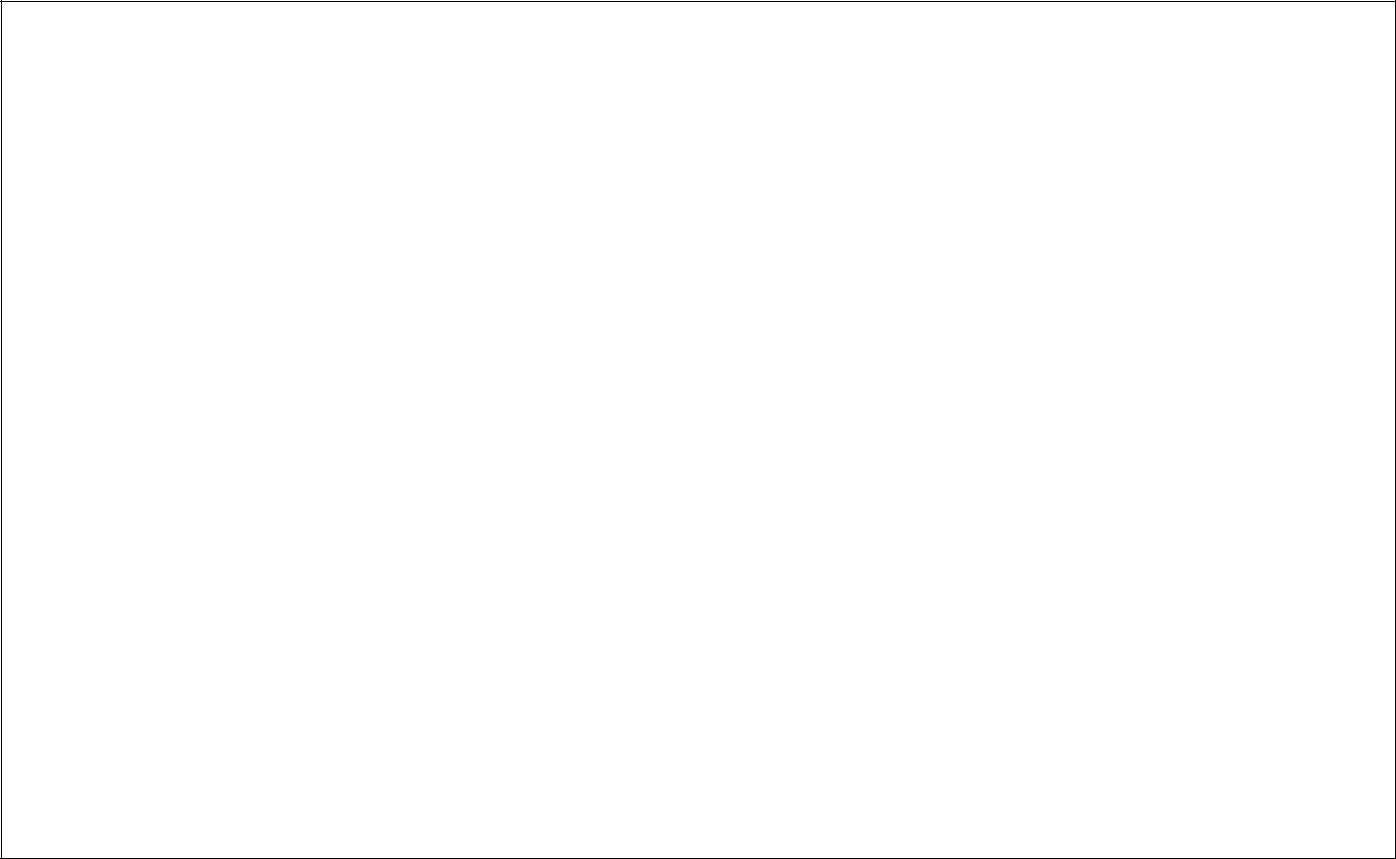
if dsu.find(v) != dsu.find(u) dsu.join(v, u) result.add(v, u, vu.weight)

return result

*Рис. 2. Листинг псевдокода алгоритма Краскала*

**2.3. Алгоритм Борувки**

На вход алгоритма подается связный неориентированный граф. Для каждого ребра задается его стоимость.



BORUVKA\_MST()

result = Graph(graph.V.size) dsu = DSU(graph.V.size) fill(min, INF)

k = graph.V.size while k > 1

is\_forest = true for vu in graph.E

if dsu.find(v) != dsu.find(u)

if vu.weight < graph.E[min[v]].weight min[v] = vu

is\_forest = false

if vu.weight < graph.E[min[u]].weight min[u] = vu

is\_forest = false

if is\_forest break

for i = 1..graph.V.size if min[i] < INF

vu = graph.E[min[i]]

if dsu.find(v) != dsu.find(u) result.add(v, u, vu.weight) dsu.join(v, u)

dec(k)

return result

*Рис. 3. Листинг псевдокода алгоритма Борувки*

**2.4. Интерфейс класса Graph**

Конструкторы:

— *Graph(int n);* — граф с *«N»* изолированными вершинами.

Публичные методы:

— *Graph getLinkTreePrim();* — метод класса, реализующий алгоритм Прима;

— *Graph getLinkTreeKruscal();* — метод класса, реализующий алгоритм Краскала;

— *Graph getLinkTreeBoruvka();* — метод класса, реализующий алгоритм Борувки;

1. **Интерфейс класса DSU**

Для реализации проверки принадлежности вершин к различным компонентам связности была реализована структура данных «система непересекающихся множеств».

Конструкторы:

— *DSU(int n)* — система из N изолированных элементов;

Публичные методы:

— int findingSets(int x) — в каком множестве находится элемент x;

— void unitSets(int x, int y) — объединение множеств, которым

принадлежат x и y.

**3. Практическая работа №3**

Требуется реализовать проверку существования Эйлерова пути или цикла в графе, алгоритма Флери — поиска Эйлерова пути или цикла в графе, и эффективный алгоритм построения Эйлерова пути.

**3.1. Проверка существования Эйлерова пути**

Для того, чтобы граф содержал Эйлеров цикл, необходимо и достаточно, чтобы: все вершины имели четную степень и все компоненты связности кроме, может быть одной, не содержали ребер.

Для того, чтобы граф содержал Эйлеров цикл, необходимо и достаточно, чтобы количество вершин с нечетной степенью было меньше или равно двум и все компоненты связности кроме одной не содержали бы ребер.



CHECK\_EULER(circle\_exist) circle\_exist = false odd\_degree = 0

start = 0

for v in graph.V

if odd(v.degree) inc(odd\_degree) start = v

if odd\_degree > 2 return 0

dsu = DSU(graph.V.size) for vu in graph.E

dsu.join(v, u)

fill(distinct, false)

for i = 1 .. graph.V.size – 1 v = dsu.find(i)

u = dsu.find(i + 1) if v != u

distinct[v] = true distinct[u] = true

count = 0

for v in graph.V

if distinct[v] and v.degree > 0 inc(count)

if count > 1 return 0

if start != 0 circle\_exist = true

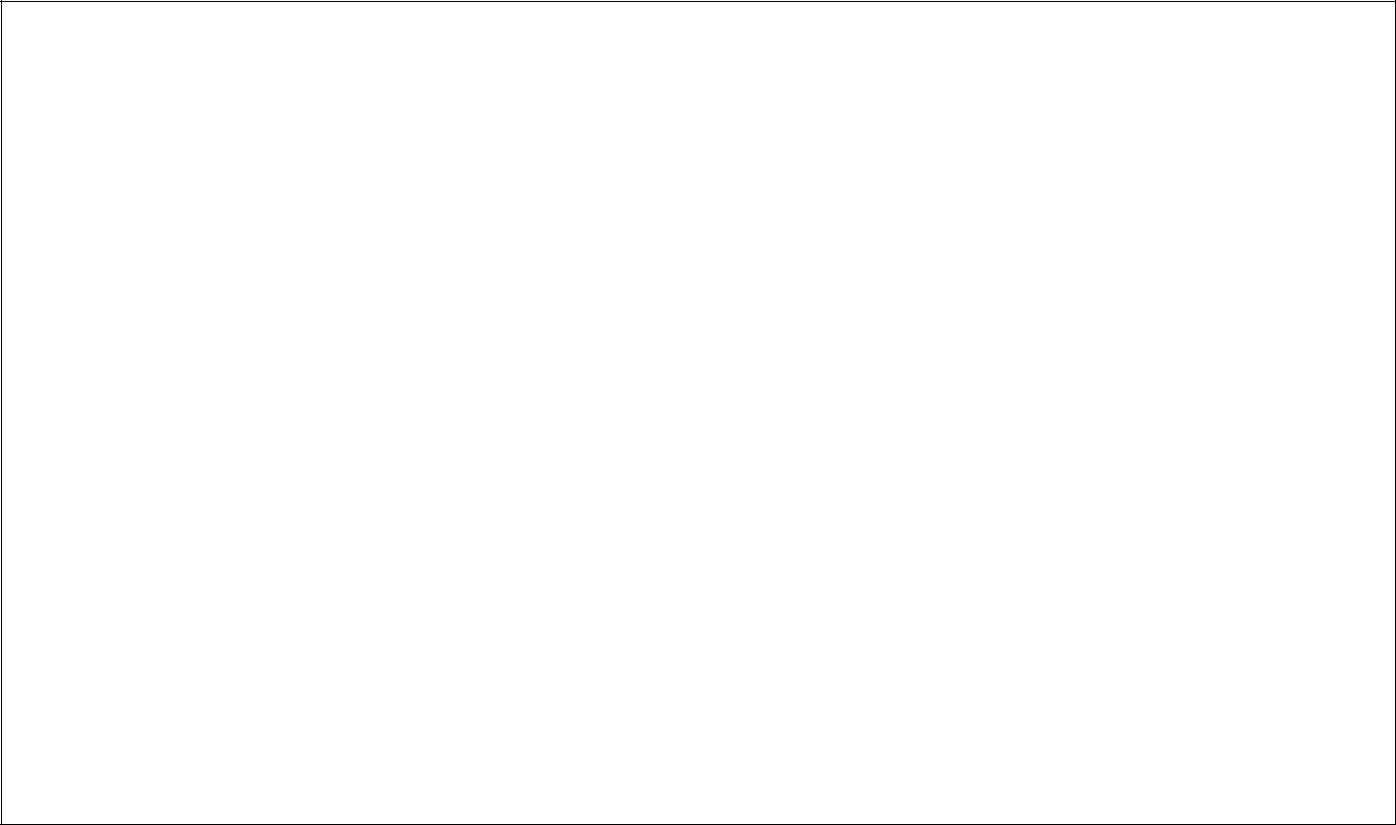
return start

*Рис. 4. Листинг псевдокода проверки Эйлерова Пути*

**3.2. Алгоритм Флери**

Алгоритм находит Эйлеров цикл как в ориентированном, так и в неориентированном графе.

Перед запуском алгоритма необходимо проверить граф на эйлеровость. Чтобы построить Эйлеров путь, нужно запустить алгоритм из вершины с нечетной степенью, если таковая имеется.



EULERAN\_TOUR\_FLERI() result = []

start = CHECK\_EULER(circle\_exist) if start == 0

return result v = start result.add(v) while true

if v.degree == 0 break

flag = true

for u in v.neighbours

if v.deg == 1 or not IS\_BRIDGE(v, u) flag = false

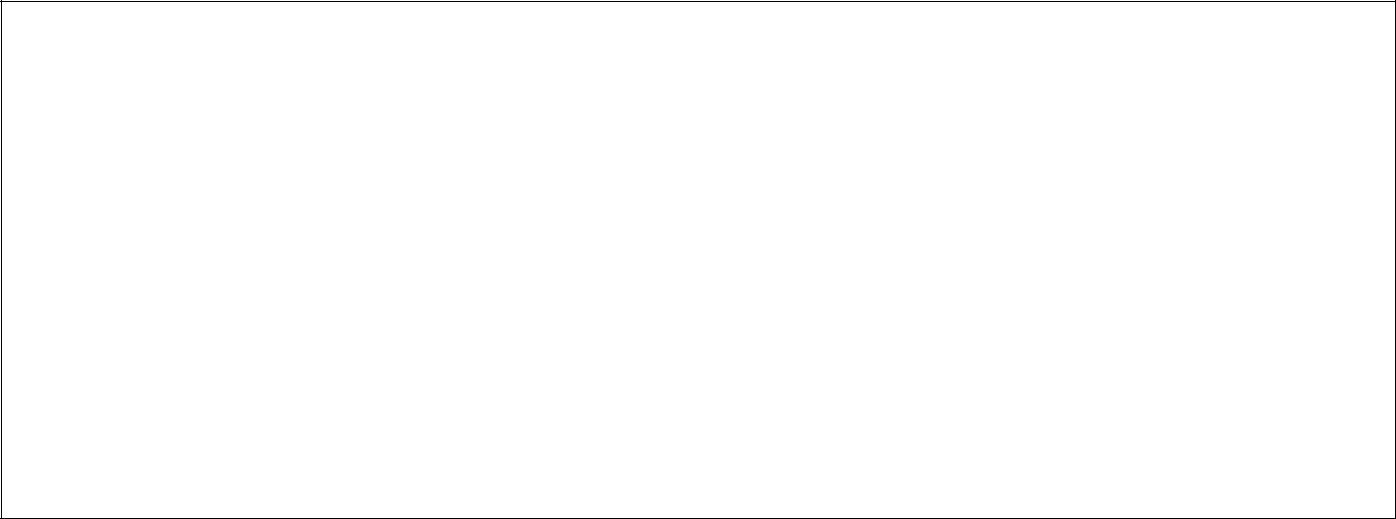
graph.remove(v, u) v = u result.add(v) break

if flag

u = v.neighbours[0] graph.remove(v, u) v = u

result.add(v) return result

*Рис. 4. Листинг псевдокода алгоритма Флери*



IS\_BRIDGE(from, to) fill(used, false) queue.push(from) used[from] = true while not queue.empty

v = queue.pop()

for u in v.neighbours

if v == from and u == to continue

if not used[u] if u == to

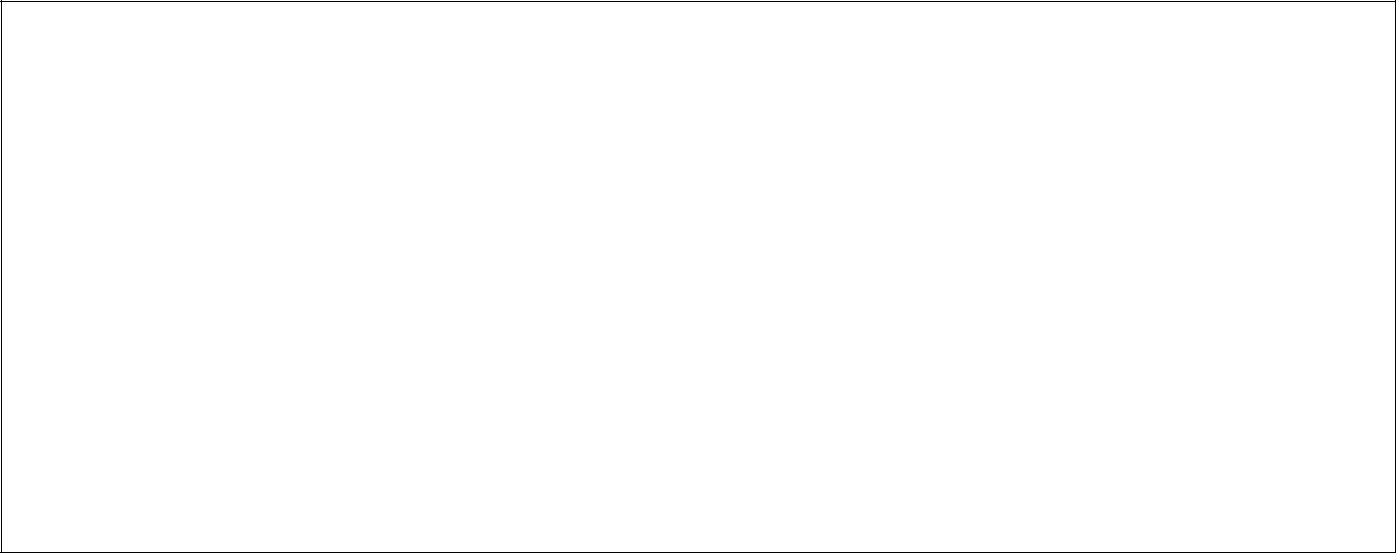
return false used[u] = true queue.push(u)

return true

*Рис. 5. Проверка Ребро — Мост*

**3.3. Эффективный алгоритм построения Эйлерова пути**

Алгоритм находит Эйлеров цикл как в ориентированном, так и в неориентированном графе. Перед запуском алгоритма необходимо проверить граф на эйлеровость. Чтобы построить Эйлеров путь, нужно запустить алгоритм из вершины с нечетной степенью, если таковая имеется.



EULERAN\_TOUR\_EFFECTIVE() result = []

start = CHECK\_EULER(circle\_exist) if start == 0

return result stack.push(start) while not stack.empty

v = stack.top()

for u in v.neighbours stack.push(u) graph.remove(v, u) break

if v == stack.top() stack.pop() result.add(v)

return result

*Рис. 6. Листинг псевдокода алгоритма оптимального построения Эйлерова пути*

**3.4. Интерфейс класса Graph**

Публичные методы класса:

— *int reviewEulerWay();* — метод класса, позволяющий произвести проверку существования Эйлерова пути

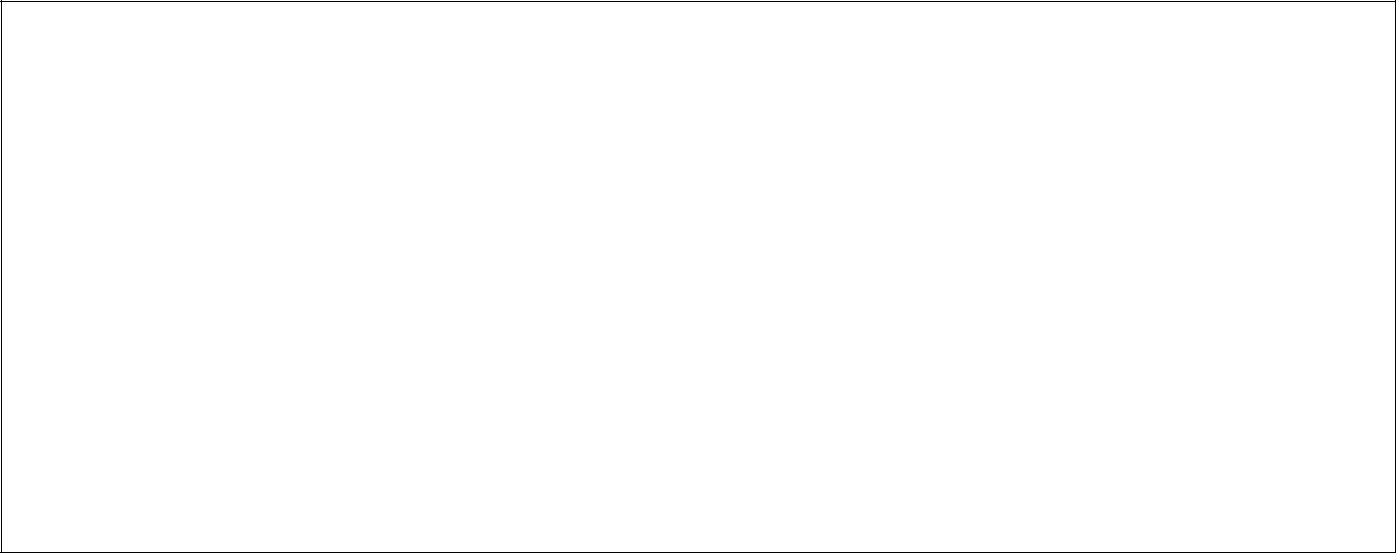
— *std::vector<int> buildFleriPath();* — метод класса, находящий Эйлеров цикл как в ориентированном, так и в неориентированном графе.

**4. Лабораторная работа №4**

Требуется реализовать построение максимального числа паросочетаний в двудольном графе с помощью алгоритма Куна. Помимо этого, необходимо реализовать проверку графа на двудольность.

**4.1. Проверка графа на двудольность**

Граф является двудольным тогда и только тогда, когда он содержит более одной вершины и все его циклы имеют четную длину.



CHECK\_BIPART(marks)

if graph.V.size < 2 return false

for v in graph.V

if marks[v] != 0 and marks[v] != 1 marks[v] = 0

queue.push(v)

while not queue.empty u = queue.pop()

for w in u.neighbours

if marks[w] != 0 and marks[w] != 1 marks[w] = marks[u] == 0 ? 1 : 0 queue.push(w)

else if marks[u] == marks[w] return false

return true

*Рис. 7. Листинг псевдокода проверки графа на двудольность*

**4.2. Алгоритм Куна**

Алгоритм основан на следующих принципах: если из всех элементов произвольной строки или столбца вычесть одно и то же число y, общая стоимость уменьшится на y, а оптимальное решение не изменится; если есть решение нулевой стоимости, оно оптимально.

Алгоритм ищет значения, которые надо вычесть из всех элементов каждой строки и каждого столбца (разные для разных строк и столбцов),

такие, что все элементы матрицы останутся неотрицательными, но появится нулевое решение.



KUHN()

result = [] fill(bipart, -1) fill(marks, -1) fill(used, false) for v in graph.V

if marks[v] == 1 continue

for u in v.neighbours if bipart[u] != -1

bipart[u] = v used[v] = true break

if CHECK\_BIPART(marks) for v in graph.V

if used[v] or marks[v] == 1 continue

fill(used\_dfs, false) DFS(v, used\_dfs, bipart)

for v in graph.V

if marks[v] == 1 and bipart[v] != -1 result.add((bipart[v], v))

return result

*Рис. 8. Листинг псевдокода алгоритма Куна*

**4.3. Интерфейс класса Graph**

Публичные методы:

— *int reviewPart(std::vector<char>);* — метод класса, реализующий построение максимального числа паросочетаний в двудольном графе;

— *std::vector<std::pair<int, int>> landEverPart();* — метод, собственно, получения максимального паросочетаний в двудольном графе

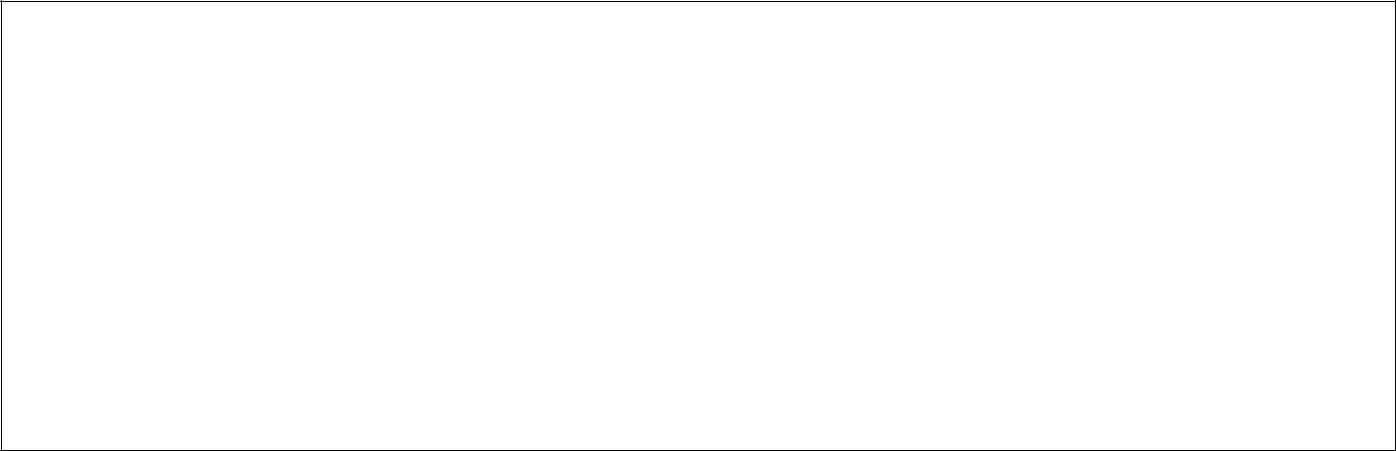
**5. Лабораторная работа №5**

Требуется реализовать следующие алгоритмы вычисления максимального потока — алгоритм Форда—Фалкерсона и алгоритм Диница.

**5.1. Алгоритм Форда-Фалкерсона**

Алгоритм начинает свою работу с нулевого потока и на каждой своей итерации увеличивает поток в сети. На каждом шаге находится увеличивающая величину потока цепь. Поток увеличивается вдоль дуг этой цепи, пока она не станет насыщенной.

Псевдокод вспомогательного поиска в глубину:



DFS(source, sink, flow, used, edges, head) if source == sink

return flow used[source] = true

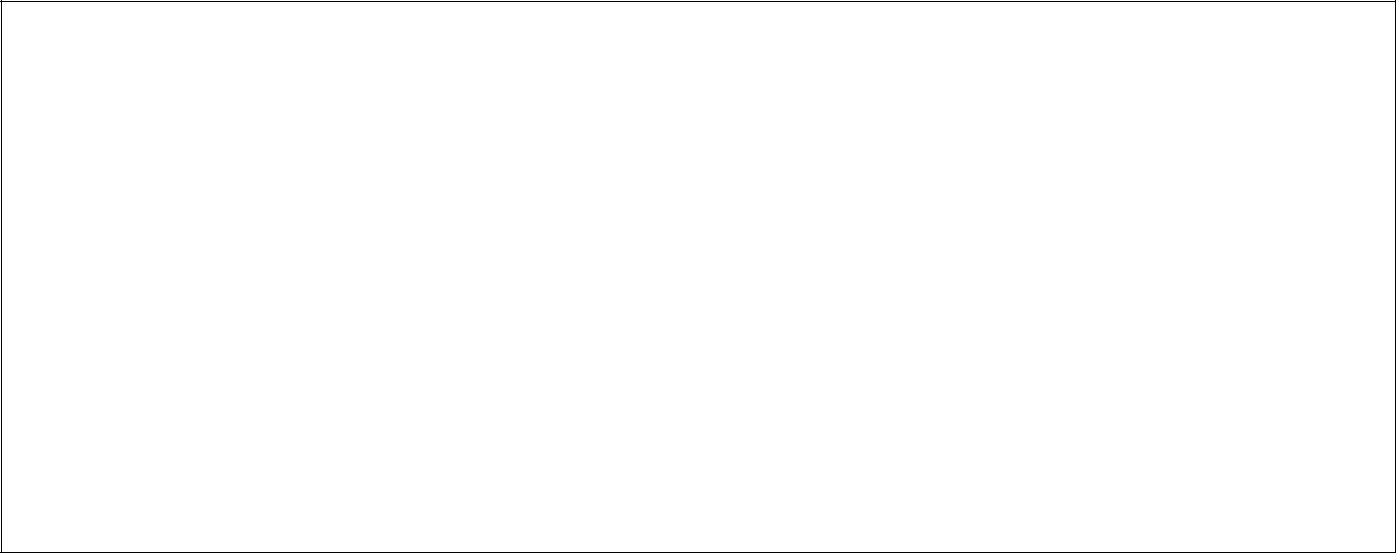
for i = head[source]; i != -1; i = edges[i].next

if not used[edges[i].to] and edges[i].flow < edges[i].capacity new\_flow = min(flow, edges[i].capacity – edges[i].flow) pushed = DFS(edges[i].to, sink, new\_flow, used, edges, head) if pushed != 0

edges[i].flow += pushed edges[i ^ 1].flow -= pushed return pushed

return 0

*Рис. 9. Листинг псевдокода вспомогательного поиска в глубину*



FORD\_FULKERSON(source, sink) result = Graph(graph.V.size) fill(head, -1)

edges = []

for vu in graph.E

edges.add(v, u, head[v], vu.weight, 0) edges.add(u, v, head[u], 0, 0)

head[v] = graph.E.size – 2 head[u] = graph.E.size – 1

while true

fill(used, false)

if DFS(source, sink, INF, used, edges, head) == 0 break

for i = 0; i < graph.E.size; i += 2 result.add(edges[i].from, edges[i].to, edges[i].flow)

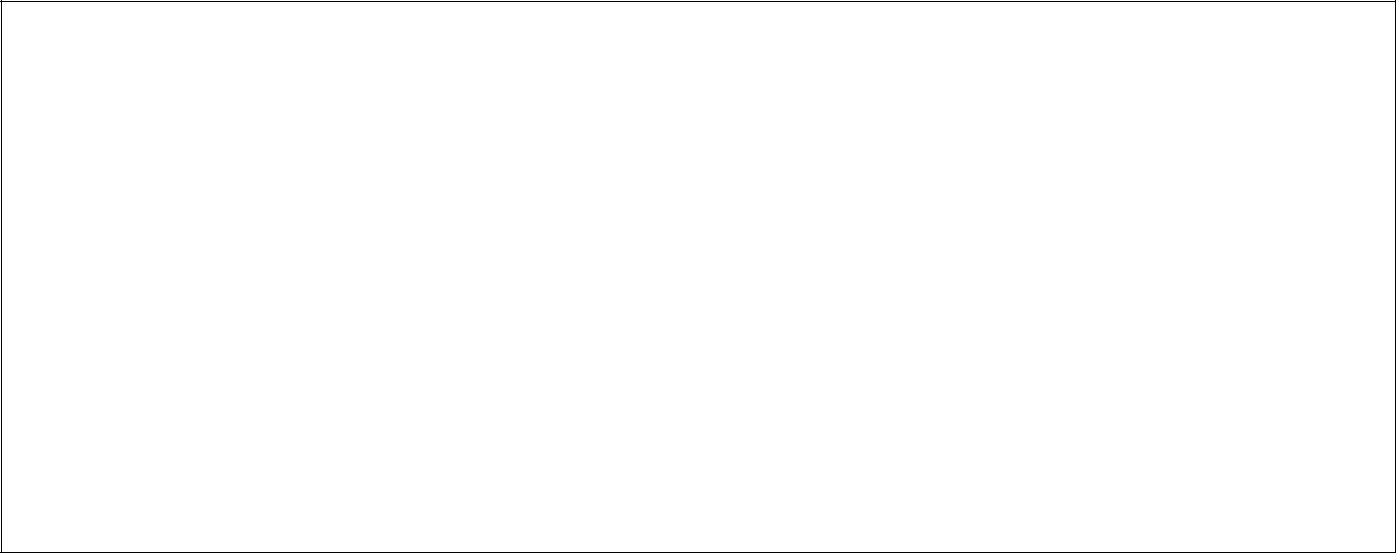
return result

*Рис. 10. Листинг псевдокода алгоритма Форда—Фалкерсона*

**5.2. Алгоритм Диница**

Основная идея метода реализации: алгоритм состоит из фаз, на которых поток увеличивается сразу вдоль всех кратчайших цепей определенной длины. Для этого на *i-ой* фазе строится вспомогательная бесконтурная сеть. Эта сеть содержит все увеличивающие цепи, длина которых не превышает *ki*, где *ki* – длина кратчайшего пути из *s* в *t*. Величину *ki* называют длиной вспомогательной сети.

Псевдокод вспомогательного поиска в глубину:



DFS(source, sink, flow, layer, edge\_capacity, edge\_flow) if source == sink or flow == 0

return flow

for v in source.neighbours

if layer[v] != layer[source] + 1 continue

new\_flow = min(flow, edge\_capacity[(source, v)] – edge\_flow[(source, v)]

pushed = DFS(v, sink, new\_flow, layer, edge\_capacity, edge\_flow) if pushed != 0

graph.E[(source, to)].weight -= pushed graph.E[(to, source)].weight += pushed edge\_flow[(source, to)] += pushed edge\_flow[(to, source)] -= pushed return pushed

return 0

*Рис. 11. Листинг псевдокода вспомогательного алгоритма поиска в глубину*



DINITZ(source, sink)

result = Graph(graph.V.size) g = Graph(graph.V.size) edge\_capacity = []

edge\_flow = [] for vu in graph.E

g.add(v, u, vu.weight) g.add(u, v, 0) edge\_capacity[vu] = vu.weight edge\_capacity[uv] = vu.weight edge\_flow[vu] = 0 edge\_flow[uv] = vu.weight

while true fill(layer, -1) layer[source] = 0

queue.push(source)

while not queue.empty and layer[sink] == -1 v = queue.pop()

for u in v.neighbours

if layer[u] == -1 and edge\_flow[vu] < edge\_capacity[vu] queue.push(u)

layer[u] = layer[v] + 1

if g.DFS(source, sink, INF, layer, edge\_capacity, edge\_flow) == 0 break

for v in g.V

for u in v.neighbours if v >= u

result.add(u, v + 1, vu.weight)

return result

**5.3. Интерфейс класса Graph**

Публичные методы:

— *Graph springFordFulkerson(int sourse, int sink);* — метод класса, позволяющий произвести вспомогательный поиск в глубину;

— *Graph springDinitz(int sourse, int sink).* — метод класса, позволяющий увеличивать поток вдоль всех кратчайших цепей;

1. **Заключение**

В ходе выполнения лабораторных работ были изучены вышеперечисленные алгоритмы, а именно: алгоритмы Прима, Краскала, Борувки, Флери, Куна, Диница и Форда-Фалкерсона. Все алгоритмы были написаны на языке программирования С++. Помимо этого, были реализованы вспомогательные методы и структуры данных для этих алгоритмов. Например, различные модификации поисков в глубину и в ширину и система непересекающихся множеств.