

На правах рукописи

ШАЙХУЛЛИН ИРЕК РИНАТОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА
УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ**

**Специальность 05.23.02 – Основания и фундаменты,
подземные сооружения**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа 2002

Работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете.

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Незамутдинов Шамиль Равильевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, старший научный сотрудник Рыжков Игорь Борисович кандидат технических наук Рыбаков Анатолий Викторович
Ведущая организация:	Проектно-технологический институт «КПД - проект», г.Уфа

Защита состоится «14» ноября 2002 г. в 16-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.289.02 в Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу:

450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «14» октября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

О.Л. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена следующими основными причинами: 1) в больших городах наблюдается дефицит территорий и необходимо осваивать неудобные с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями - заовраженные и подрабатываемые территории, что требует повышения точности расчетов и возможности учета как можно большего числа факторов, влияющих на устойчивость откосов и склонов; 2) задача обеспечения устойчивости естественных склонов тесно связана с проектированием противооползневых удерживающих конструкций, поэтому (как отмечено в монографии Л.К. Гинзбурга «Противооползневые удерживающие конструкции») важное практическое значение имеет возможность определения напряженно-деформированного состояния грунта (НДС) и «призмы обрушения» массива в момент перехода склона в предельное (критическое) состояние, что позволяет вычислить величину оползневого давления, наиболее соответствующего действительному, но в настоящее время это сопряжено с рядом трудностей, так как существующие теоретические методы не предназначены для решения данной проблемы.

Устойчивость откосов и склонов - это частная задача общей теории предельного напряженного состояния грунтов, но имеет существенные особенности, обусловленные спецификой движения масс при нарушении их устойчивости. Существующие в настоящее время методы расчета устойчивости откосов используют два основных подхода: 1) инженерные или графо-аналитические методы расчета, основанные на теории «жескопластичного тела»; 2) численные методы расчета откосов.

Существующие методы первого подхода дают ответ на вопрос об устойчивости откоса при заданной поверхности скольжения. Сложность заключена в необходимости задания как самой поверхности потери

устойчивости, так и ее формы. Это обуславливает уже на начальном этапе расчета приближенность метода. Кроме того, для решения статически определимой задачи в уравнения равновесия системы приходится вводить ряд допущений относительно сил взаимодействия между оползающими частями массива грунта откоса.

Об устойчивости откоса (склона) судят по значению коэффициента устойчивости (КУ), но само значение КУ рассчитывается заменой напряжений силами, что приближенно удовлетворяет теории прочности грунта на сдвиг.

Численные методы определяют напряженно-деформированное состояние (НДС) откоса, но при этом в явном виде не определяется момент потери устойчивости. Решение принимают на основе схождения или расхождения итерационного расчета, где максимальное число циклов назначается проектировщиком.

В диссертационной работе сделана попытка разработать численный метод расчета устойчивости откосов и склонов с применением теории графов, которая позволяла бы на ЭВМ задать расчетную схему и вычислить НДС откоса; проанализировать значения напряжений и выделить области критического состояния грунта массива; проконтролировать их развитие в процессе итераций и установить момент потери устойчивости откоса, что дает возможность исключить два основных недостатка существующих методов, а именно:

- 1) не требует задания формы поверхности скольжения;
- 2) не требует априорного назначения максимального числа итерационных циклов.

Кроме того, остановка расчета в момент потери устойчивости позволяет получить НДС грунта, соответствующее предельному состоянию откоса и выделить в массиве «призму обрушения», что имеет практическое значение для проектирования удерживающих конструкций.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель работы.

Цель работы

Разработать численный метод с применением теории графов для определения момента потери устойчивости откоса (склона) и его программная реализация.

В соответствии с поставленной целью решены следующие задачи:

1. Проанализированы существующие методы расчета.
2. Разработана методика контроля потери устойчивости откоса.
3. Для явного определения момента потери устойчивости откоса применена теория графов – свойство связанного плоского графа.
4. Разработан алгоритм построения связанного графа – математическая модель «граф-откос», описывающего конечно-элементную расчетную схему откоса.
5. Разработана единая программа расчета НДС и поиска цепи в «граф – откосе» для четырехугольного изопараметрического конечного элемента в упруго-пластической постановке задачи.
6. Разработаны критерии потери устойчивости откоса на основе анализа связанности графа.
7. Проведено численное исследование предложенного метода.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в предложенном впервые методе расчета устойчивости откосов (склонов) с применением теории графов.

Практическое значение

Разработанный программный комплекс «Slope» расчета устойчивости откоса при помощи модели «граф - откос» позволяет автоматизировать процесс определения состояния и момента потери устойчивости откоса (склона), а так же определить оползающий массив неустойчивого откоса, что может быть использовано при проектировании удерживающих конструкций с учетом конкретного объема призмы обрушения.

Реализация работы

В 2000 г. разработанный метод использован муниципальным предприятием «Башпромстройпроект» при расчете оползающего откоса на объекте «Двухэтажные подземные гаражи» квартал №570 Кировского района города Уфы.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы были опубликованы в сборнике «Проблемы строительного комплекса России» на 5 международной научно-технической конференции при 5 специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2001» и 6 международной научно-технической конференции при 6 специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2002».

По результатам исследований опубликовано 5 статей.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающей 131 наименование и приложения. Общий объем диссертации составил 164 страницы, в том числе 75 рисунков, 5 таблиц и одно приложение.

На защиту выносятся

1. Методика контролирования потери устойчивости откоса с использованием теории графов.
2. Алгоритм и программа численного расчета НДС откосов по предложенному методу с учетом пластичности грунта.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи, изложена новизна и практическая значимость работы.

Первая глава. В первой главе описан анализ существующих методов расчета устойчивости откосов, их достоинства и недостатки. Подробно рассмотрены графо-аналитические методы расчета (так как они разрешены и указаны в действующих нормативных документах), приведена условная классификация по двум основным позициям: 1) используемые уравнения равновесия расчетной схемы и 2) обоснование и выбор предполагаемой поверхности потери устойчивости. Это сделано в связи с тем, что применимость той или иной методики обусловлена геологическим сложением откоса и классом проектируемого сооружения. В соответствии с принятым разделением по уравнениям равновесия расчетной схемы можно выделить: 1 – методы общего равновесия моментов; 2 – методы равновесия сил; 3 – методы равновесия моментов и сил. По формам поверхностей скольжения выделяются: 1) плоская, 2) круглоцилиндрическая, 3) ломаная, 4) произвольная. Выбор той или иной поверхности скольжения основан на следующих фактах: свойства грунтов, слагающих склон; визуальные наблюдения за подвижками грунта на склоне и результаты геодезических замеров; опыт проектировщика; класс ответственности проектируемых объектов и возможный ущерб от разрушения склона. Из новых методов расчета устойчивости откосов можно выделить метод, предлагаемый Богомоловым А.Н.

В результате проведенного анализа существующих методов расчета устойчивости откосов сделаны следующие выводы:

1. Инженерные или графо-аналитические методы – это приближенные методы, основанные на рассмотрении равновесия «жесткопластичного тела», основное достоинство – оценивают состояние откоса (склона) одним математическим параметром – КУ. Основные недостатки:

- 1) что бы сформировать расчетную схему (РС) необходимо задать форму поверхности потери устойчивости;
- 2) выполнить расчет возможно только при достижении статической определенности РС, что требует вводить ряд допущений как в саму РС,

так и в уравнения равновесия сил;

3) в некоторых случаях допуск полной мобилизации «сцепления» грунта по всей поверхности скольжения приводит к завышению значения КУ, так как в части поверхности массив грунта может испытывать действие растягивающих напряжений;

4) методы не позволяют выполнить расчет откоса по второй группе предельных состояний.

2. По сравнению с методами первого подхода численные методы имеют ряд достоинств, а именно: строго следуют теории предельного напряженного состояния грунта; позволяют подобрать РС, наиболее соответствующую реальным условиям «работы» откоса; позволяют решать упругопластические задачи. Однако все они имеют следующие существенные недостатки:

1) непосредственно по результатам расчета НДС откоса не определяют его устойчивость, а результат оценки устойчивости зависит от заданного числа итераций, что формирует субъективный фактор;

2) не позволяют выявить наиболее опасную поверхность скольжения;

3) НДС грунта, вычисленное на последнем шаге итерации, не соответствует моменту перехода откоса в запредельное состояние и не может быть использовано для дальнейшего анализа задачи или в проектировании удерживающих конструкций.

Вторая глава посвящена определению основных принципов и обоснованию предлагаемого метода расчета. Определено понятие модели «граф-откос» и его формирование до начала расчета (исходный граф), сопоставлена устойчивость откоса и связанность граф-откоса (текущий граф), а также разработаны критерии для несвязанного граф-откоса, по которым однозначно определяется неустойчивый откос.

Разработанный метод расчёта устойчивости откосов (склонов) является численным методом расчёта. Для определения НДС массива грунта откоса

(склона) применяется метод конечных элементов (МКЭ). Основная формула алгоритма решения задачи - формула МКЭ в перемещениях (1):

$$[\mathbf{K}] * \{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{R}\}, \quad (1)$$

где \mathbf{K} – матрица жёсткости ансамбля КЭ, равная сумме жёсткостей КЭ,

$$K = \sum_{i=1}^n k_i; k_i - \text{жёсткость } i\text{-го элемента; } \mathbf{U} - \text{вектор перемещений узлов } (u, v);$$

\mathbf{R} – вектор нагрузок.

Почти все откосы и склоны имеют большую протяжённость, поэтому в работе рассматривается НДС для условий задачи плоской деформации. Момент потери устойчивости откоса и величина критической нагрузки определяются с помощью «граф – откоса» при рассмотрении НДС грунта и его оценке по критерию прочности Мора – Кулона (2), расчёт пластичных зон массива грунта откоса ведётся на основе деформационной теории пластичности академика Ильюшина А.А. по итерационному методу переменных параметров упругости (3).

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\sigma_c}. \quad (2)$$

$$\sigma_c = \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi},$$

где φ, c - угол внутреннего трения и коэффициент сцепления соответственно грунта КЭ; σ_1, σ_3 – значения максимального и минимального главного напряжения соответственно.

$$E_c = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i},$$

$$\frac{1}{E_v} = \frac{1}{E_c} + \frac{1-2V_0}{3E_0}, \quad (3)$$

$$V_v = \frac{3E_v}{2E_c} - 1,$$

где E_i – секущий модуль упругости; E_v – переменный параметр модуля общей

деформации E_0 грунта КЭ; V_0 – коэффициент бокового расширения грунта КЭ; V_v – переменный параметр V_0 .

В работе предлагается использовать изопараметрический четырехугольный КЭ произвольной формы (рис. 1), исходя из следующих соображений:

- 1) по удобству формирования РМ и степени приближения произвольный четырехугольный КЭ не уступает треугольному;
- 2) точность решения для четырехугольника выше, чем для треугольника за счет увеличения степеней свободы на две компоненты в четвертом узле;
- 3) применение произвольного четырехугольного КЭ сохраняет общность подхода решения задачи, где в зависимости от геометрической правильности поперечного профиля откоса (склона), например, с вертикальными стенками, автоматически (без изменения программного кода) область может быть разбита на КЭ прямоугольной формы;

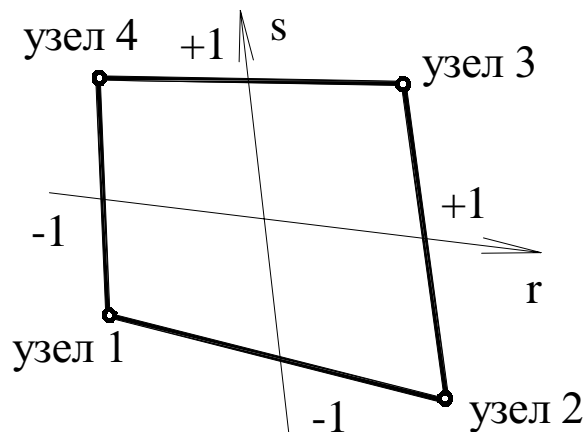


Рис.1. Изопараметрический произвольный четырёхугольный четырёхузловой конечный элемент

- 4) резкий скачок в совершенствовании аппаратной части ЭВМ позволяет увеличить густоту сетки, что ведет к уменьшению размеров КЭ и повышает точность решения для произвольного четырехугольника.

Основными этапами расчёта устойчивости откоса являются:

1. Формирование расчётной математической модели.

2. Формирование исходного связанного планарного графа с числом вершин, равным числу КЭ. Критерий связанности – формула Эйлера (4).

$$N - M + R = 2, \quad (4)$$

где N – число вершин графа $G1$ (текущий);

M – число рёбер графа $G1$;

R – число граней с учётом бесконечной.

3. Определение КЭ, работа которых не допускается за несущей способностью грунта (группа КЭ по контакту фундамента сооружения на откосе).

4. Помечивание двух или более вершин исходного графа.

5. Определение НДС массива грунта откоса численным методом – МКЭ.

6. Нахождение КЭ, перешедших в пластичное состояние, и проверка с выделенными КЭ, если таких нет, то удаление вершин графа, соответствующих пластичным и разорванным КЭ.

7. Поиск цепи между помеченными вершинами графа. Если цепь найдена, граф связан (откос – сплошное тело). Для пластичных зон массива грунта откоса (склона) определение значений параметров упругости.

8. Новый расчёт по 5.

Наименее разработанным вопросом при определении момента потери устойчивости откоса (склона) является численное моделирование процесса возникновения и развития зон пластических деформаций грунта до появления сплошной поверхности скольжения и его связь с НДС массива грунта. Поэтому в данной работе основное внимание уделено совершенствованию этого аспекта проблемы.

В общем случае откос или склон может потерять устойчивость по некоторой или одновременно по некоторым поверхностям скольжения. Можно выделить: 1) потеря устойчивости выше подошвы (по скату) (рис. 2, а, поз. 1); 2) потеря устойчивости по подошве (рис. 2, а, поз. 2); 3) потеря устойчивости по основанию (рис. 2, а, поз. 3).

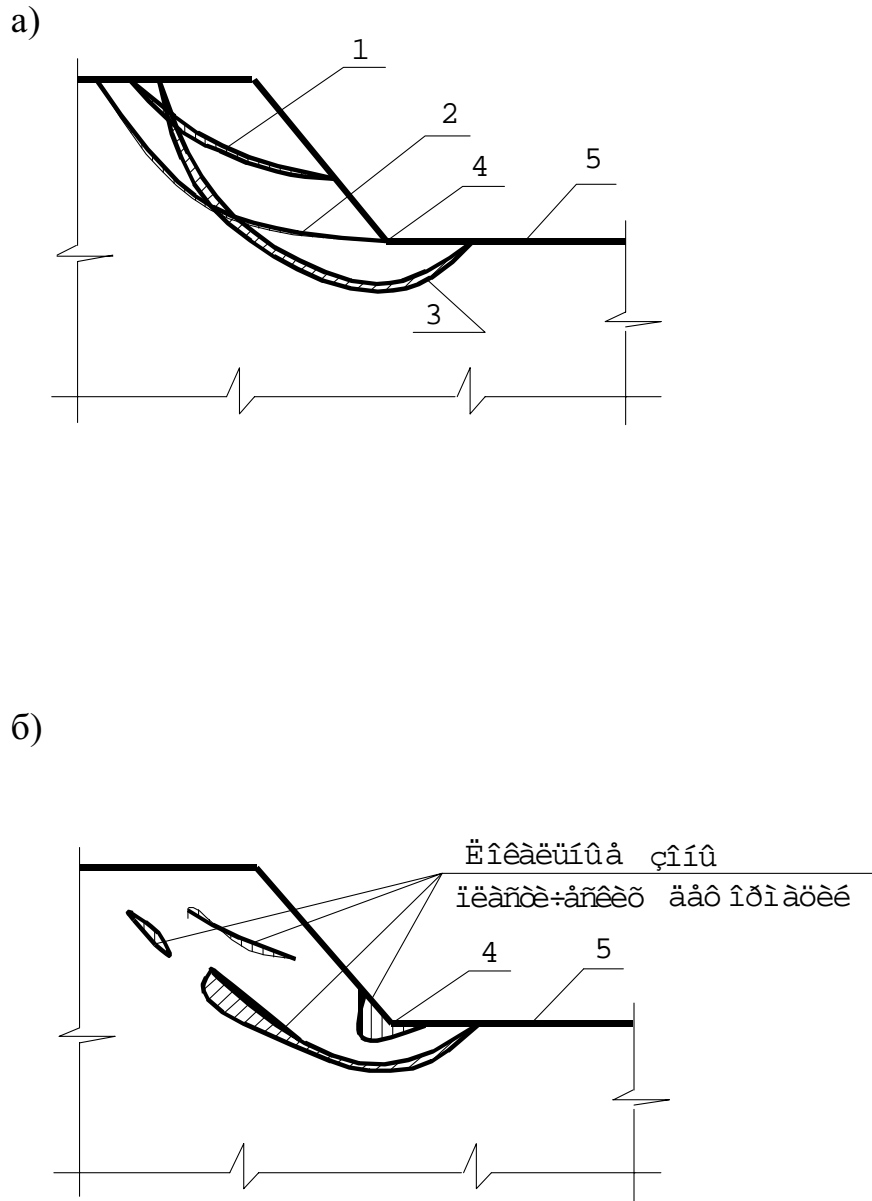


Рис. 2. Откос (склон): а) – неустойчивый, б) – устойчивый

1-3 поверхности скольжения; 4-подошва откоса; 5-поверхность основания откоса

Численный расчёт НДС откоса или склона не позволяет непосредственно определить момент потери устойчивости, но, зная напряжения в каждом КЭ и используя одну из формул теории прочности грунтов при помощи теории

графов, можно проконтролировать образование сплошной пластической зоны и областей образования трещин.

Массив грунта, ограниченный откосом (склоном), в состоянии равновесия – это геометрически сплошное тело (рис 2 б). В теории графов его можно охарактеризовать как связанный граф, то есть любые две вершины соединены цепью или, двигаясь из любой точки массива можно попасть в любую другую или же вернуться в исходную, не встречая или обходя пластические области и зоны образования трещин.

Построим граф $G(X,U)$, ассоциированный с конечно – элементной сеткой разбивки грунтового массива (рис. 3). Каждой вершине графа $x_i \in X$ поставлен в соответствие один КЭ, следовательно, множество КЭ – множество вершин X графа $G(X,U)$. Две вершины графа смежны, если они соединены ребром. За смежные вершины принимаются КЭ, имеющие общую грань, тогда получим, что смежная грань – ребро графа $\{x_i, x_j\} \in U$, где индексы i, j – это номера вершин (номера КЭ); U – множество рёбер графа $G(X,U)$.

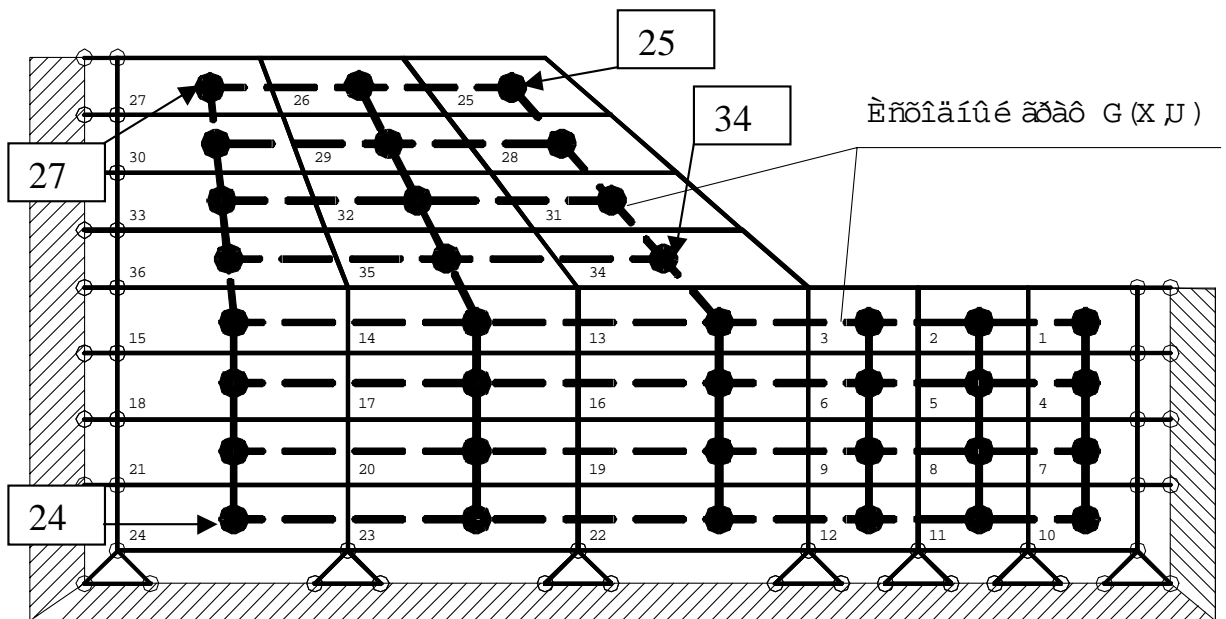


Рис. 3. Конечно-элементная сетка откоса (склона) и ее исходный граф $G(X, U)$

Граф, построенный таким образом до начала расчёта, назовём исходным графом. Он будет удовлетворять формуле (4), а следовательно, это связанный граф. В геометрической интерпретации это означает, что если исходный граф $G(X,U)$ наложить на конечноэлементную сетку (рис. 3), то на каждый КЭ попадает одна вершина графа.

В процессе расчета часть КЭ будет переходить в пластичное состояние. После каждой итерации вершины, соответствующие этим КЭ, удаляются из исходного графа вместе с инцидентными им рёбрами (рис.4).

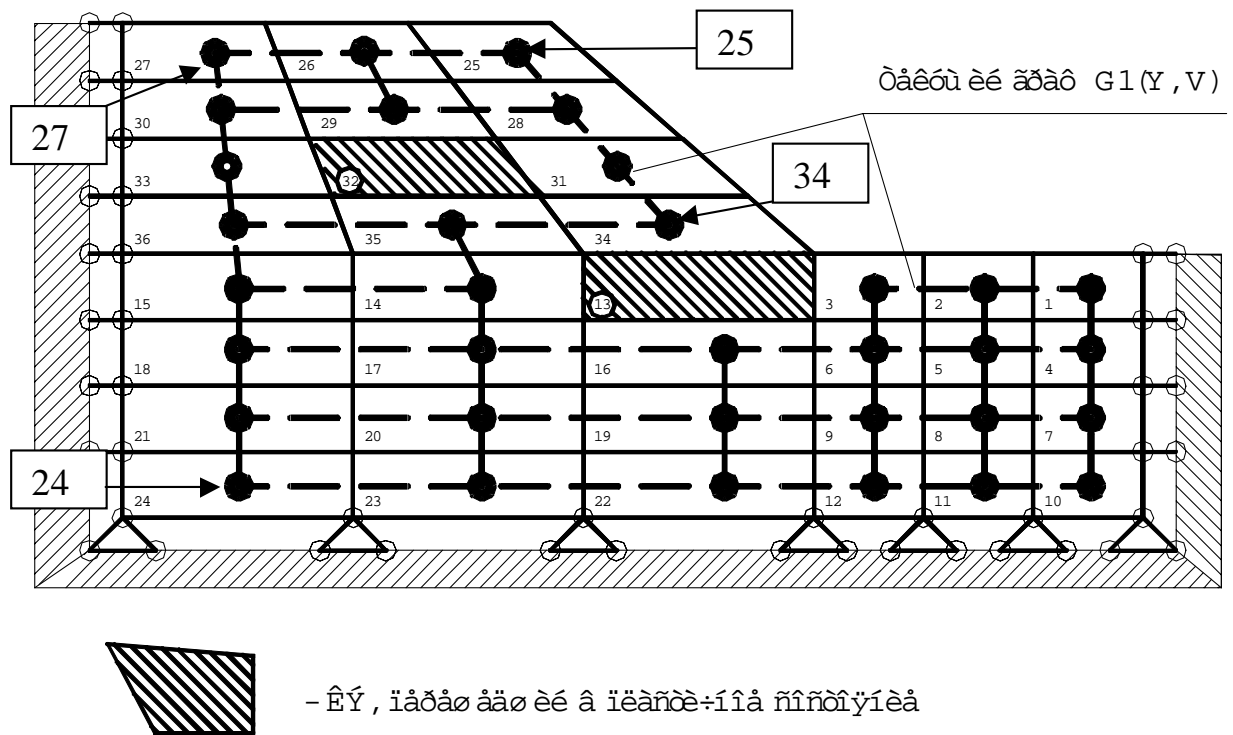


Рис. 4. Конечно-элементная сетка откоса и его текущий граф $G1(Y, V)$, соответствующий некоторому шагу итерации

Такой граф, соответствующий состоянию расчётного массива на каком – либо шаге итерации, назовём текущим графом или, согласно принятой терминологии в специальной литературе, он является подграфом $G1(Y,V)$ графа $G(X,U)$, множество вершин Y которого является подмножеством вершин X графа G , а рёбрами – часть рёбер графа G , оба конца которых лежат в множестве Y . При удалении вершины и инцидентных ей рёбер получается граф S – дополнение

подграфа $G1$ до G . Дополнение S текущего графа представляет собой характер развития пластических деформаций в массиве грунта откоса или склона. Вершины S позволяют определить пластичные КЭ. При расчётах откосов (склонов) обычно заранее известно (рис. 2, а), как примерно будет происходить потеря устойчивости. Тогда, пометив две вершины исходного графа: одну в оползневом теле, которую назовём «главной», а другую вне ее - мы зададим множество цепей между этими вершинами. После выполнения каждой итерации расчёта по МКЭ осуществляется поиск элементарной цепи между помеченными вершинами в текущем графе. При этом если цепь не найдена (рис 5), то выполняется последняя итерация, и расчёт останавливается - это означает, что откос (склон) потерял устойчивость.

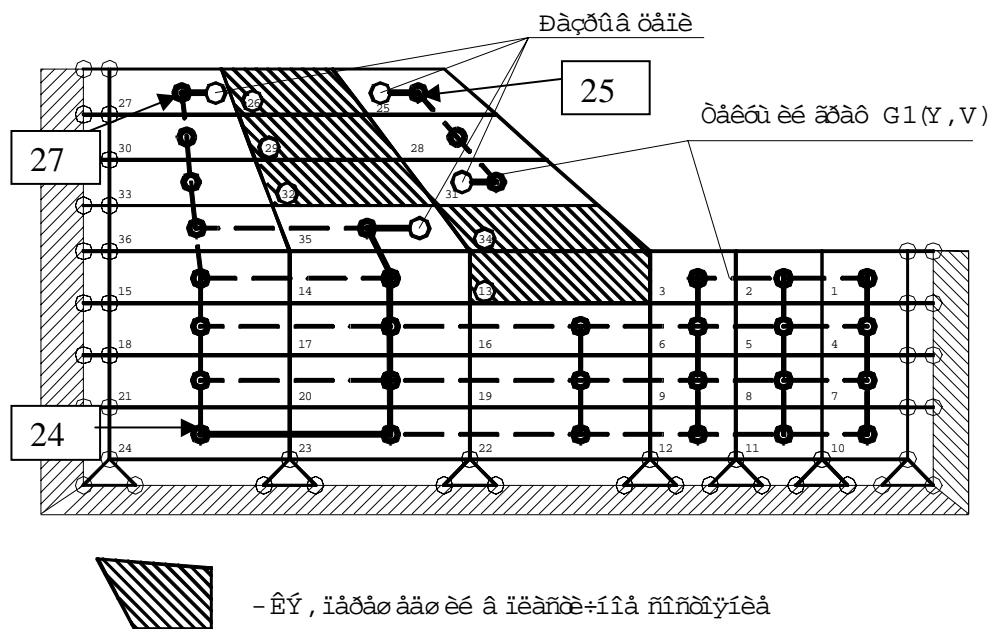


Рис. 5. Момент потери устойчивости откоса – разрыв цепи между вершинами 25-24, 25-27; вершина 34 удалена

В ходе расчетов и исследований результатов решения задач устойчивости откосов и склонов получено, что для однозначного определения устойчивости или момента потери устойчивости откоса необходимо организовать поиск минимум двух цепей. В качестве помеченных вершин следует выбирать:

- 1) вершину (главная), соответствующую КЭ бровки откоса;

- 2) вершину, соответствующую КЭ подошвы откоса;
- 3) вершину за оползневым телом, которая соответствует КЭ поверхности откоса;
- 4) вершину за оползневым телом, которая соответствует КЭ основания расчетной модели откоса.

Откос не устойчив, если одновременно отсутствует цепь между главной вершиной и вершинами пунктов 3, 4. В этом случае итерационный расчет прерывается. Если найдется хотя бы одна цепь, то это означает, что в массиве грунта откоса не сформировалась сплошная и замкнутая на элементы откоса предельная зона - откос устойчив.

Для примера, изображенного на рис. 3, главной вершиной будет №25. Помеченными будут №24, 27, 34. На рис. 5 изображен момент потери устойчивости откоса и разрыв цепи между помеченными вершинами.

Таким образом, контролирование состояния откоса в процессе численного расчета позволяет определить момент потери устойчивости откоса и выявить соответствующие ему зоны образования трещин и развития областей пластических деформаций грунта в массиве откоса. Разработанный программный комплекс «Slope» автоматизирует процесс анализа устойчивости откоса, исключает априорное, опытное назначение максимального числа итераций. Использование численного метода – МКЭ дает возможность определить НДС массива грунта откоса в упругопластической постановке задачи и непосредственно основываться на выводах «теории прочности грунта» при определении предельных значений напряжений в КЭ.

Третья глава посвящена описанию полученного в ходе исследований алгоритма для определения момента потери устойчивости откоса (склона) на основе анализа НДС массива грунта и развития зон пластических деформаций,

который реализован в виде программного комплекса «Slope». Данный программный комплекс иллюстрирует предлагаемый в этой работе подход и является законченной версией программы, готовой к применению в практике проектирования.

Общая структура программного комплекса состоит из трёх модулей, которые являются стандартными для современных САПР (схема на рис. 6).

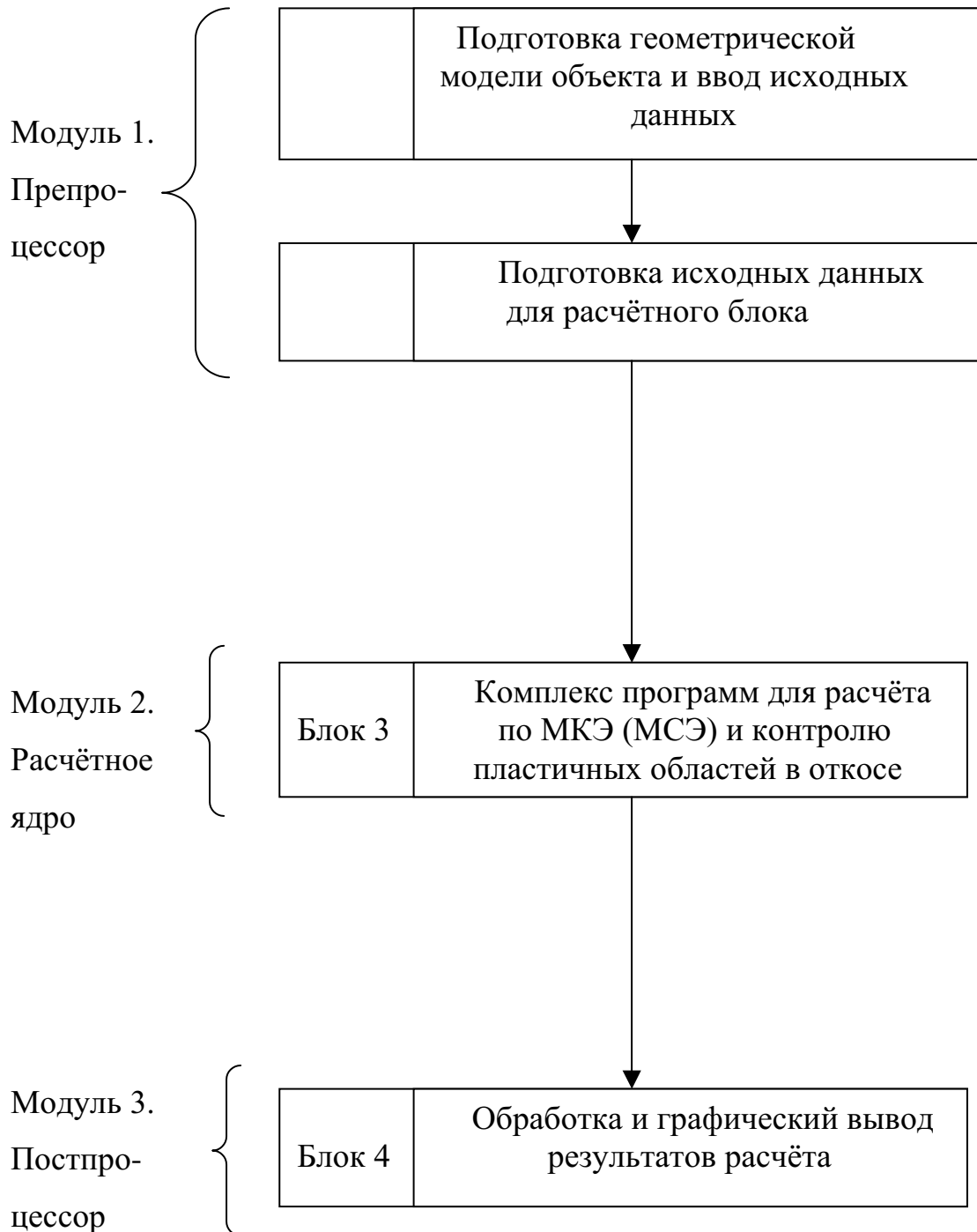


Рис. 6. Общая блок – схема программного обеспечения «Slope»

Программа разработана как приложение к системе AutoCAD. В качестве основного языка программирования используется перспективный язык C++, дающий значительные возможности по переносу программы на другие платформы ЭВМ при наличии соответствующих компиляторов, обеспечивающий высокую скорость, точность и надёжность в вычислительных процессах с числами с плавающей точкой. Части программы, предназначенные для работы в графической среде AutoCAD, написаны на базовом для среды функциональном языке программирования AutoLISP (Автолисп). Эти средства представляют возможность решения задач, возникающих в процессе работы пользователя на этапах 1 – 4 (рис. 6). Как отмечено выше, в современных расчётных пакетах САПР принято выделять три основные части – модули: препроцессор, который обеспечивает подготовку исходных данных (блок 1 и 2); процессор – расчётное ядро и постпроцессор – предназначен для заключительной обработки данных расчёта и вывода в необходимом для пользователя виде. Передача информации между модулями и блоками программного комплекса осуществляется в виде текстовых файлов в формате ASCII. Эти файлы содержат информацию в виде списков и таблиц.

Необходимо заметить, что алгоритм поиска цепи в графе откоса реализован как независимый пакет программ под систему AutoCAD и может быть использован или адаптирован под различные расчётные модули численных методов расчета устойчивости откосов или массивов грунтов.

В четвертой главе приводятся примеры расчёта, анализ и сравнение полученных результатов с результатами других методов расчёта устойчивости откосов. Поскольку сами расчёты по методу КЭ могут быть реализованы при помощи различных пакетов программ и сам метод является общепризнанным, то при исследовании НДС массива откоса основное внимание уделялось эффективности алгоритма определения момента потери устойчивости откоса.

В качестве иллюстративных примеров решен ряд задач, в том числе:

устойчивость однородного вертикального откоса для грунтов, обладающих связанностью и внутренним трением; задача осадки жесткого полосового фундамента. В качестве объекта исследования был выбран откос в районе строительства двухэтажного гаража в квартале №570 Кировского района г. Уфы.

Территория объекта исследования расположена в южной части г. Уфы и ограничена улицами Ново – Мостовая, Фрунзе, Воровского и Пушкина. В геоморфологическом отношении участок приурочен к 3 надпойменной террасе долины р. Белой. Абсолютные отметки поверхности рельефа: 118 – 144 м. С северо – запада на юго – восток территорию пересекает овраг с линейным очертанием, открывающийся в пойму р. Белой. Вершина его находится за пределами квартала. На участках прохождения улиц Ново – Мостовая и Воровского овраг засыпан.

Из физико-геологических явлений в отчете отмечены: карст, оползнеобразование, эрозия. Склоны оврага отнесены к оползне–опасным, так как для них характерно наличие в разрезе слабых глинистых и водонасыщенных песчаных грунтов. Так же отмечается наличие в массиве грунта оврага поверхностей скольжения. Площадка строительства будущего подземного гаража расположена в тальвеге оврага. Овраг на исследуемом участке имеет U-образную форму, ширина между бровками достигает 100 м, ширина тальвега 3-5 м, глубина вреза 10-20 м. Уклоны бортов достигают 70 град. На момент исследования объекта в месте освоения территории естественные склоны оврага были нарушены путем разработки грунта по бортам и подсыпки по дну. Расчет устойчивости откоса был выполнен по просьбе института «Башпромстройпроект» в связи с началом обрушения бортов оврага вдоль строительной площадки.

Цель работы – анализ устойчивости откоса и прогнозирование его дальнейшего поведения.

По данным инженерно-геологических изысканий в грунтах, слагающих

откос, выделены четыре инженерно-геологических элемента (ИГЭ). ФМС для каждого ИГЭ приведены в таблице. Плодородный слой – торф как ИГЭ не выделялся и в расчетах учитывался как равномерно-распределенная нагрузка - природная плотность 1.36 г/см³, толщина 80 см. Расчетная схема приведена на рис. 7, исходный граф на рис. 8, текущий граф, соответствующий моменту потери устойчивости, на рис. 9, изолинии касательных напряжений - на рис. 10.

Физико-механические свойства грунтов

Показатель ФМС	ИГЭ			
	насып- ной грунт ИГЭ-1	супесь пластич- ная ИГЭ-2	песок мелкий ИГЭ-3	глина полу- твердая ИГЭ-4
Плотность природная, г/см ³	1.35	2.05	1.70	1.92
Коэффициент пористости	2.4	0.86	0.81	0.75
Показатель текучести	0.53	0.22	----	0.16
Сцепление, МПа.	0.013	0.012	0.013	0.050
Угол внутреннего трения, град.	17	24	25	19
Модуль деформации в интервале 0.0-0.25 МПа, МПа	5.0	13.0	20.0	18.0
Расчетное сопротивление, МПа	0.12	----	0.30	----

Расчеты показали, что откос неустойчив. Была построена поверхность скольжения и для сопоставления с результатами по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения вычислен КУ.

Коэффициент устойчивости равен 0.87 по предлагаемому методу, 0.89 - по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения для равновесия сил и 0.81 - по отношению предельных касательных напряжений к

вычисленным значениям касательных напряжений в КЭ, которые пересекаются дугой поверхности скольжения (рис. 11, поз. 1). В первом случае отличие составило 2% в сторону уменьшения, которое объясняется учетом уменьшенной прочности грунта в зонах образования трещин, что не учитывается графо-аналитическим методом.

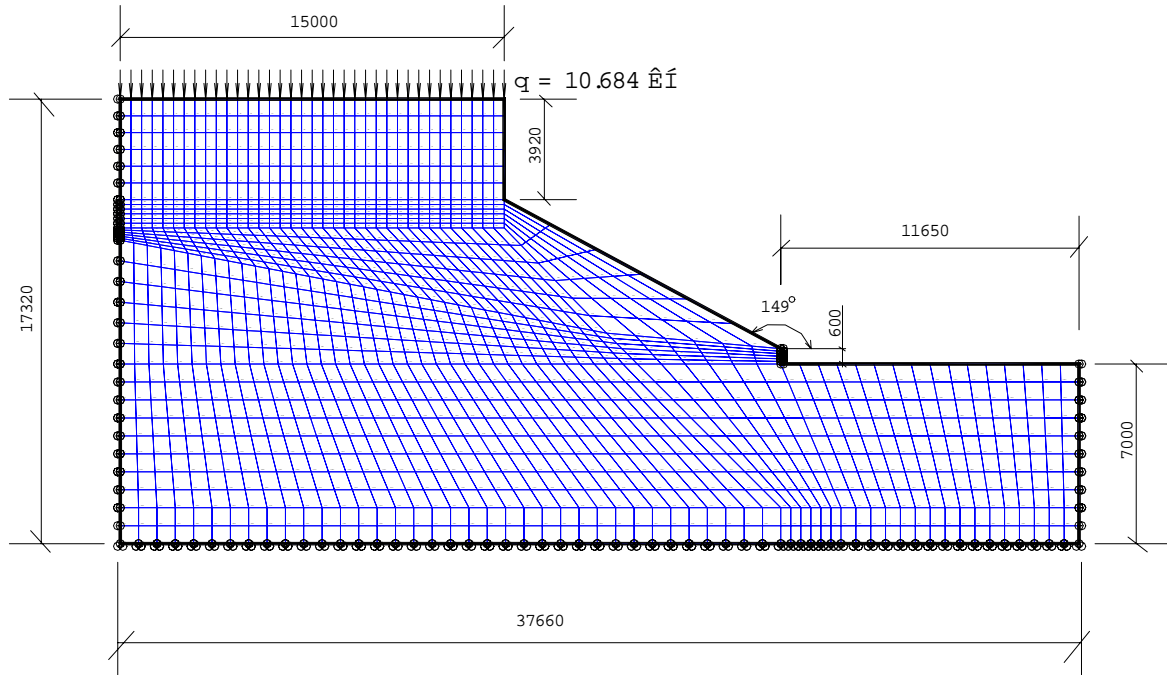


Рис. 7. Расчетная схема откоса

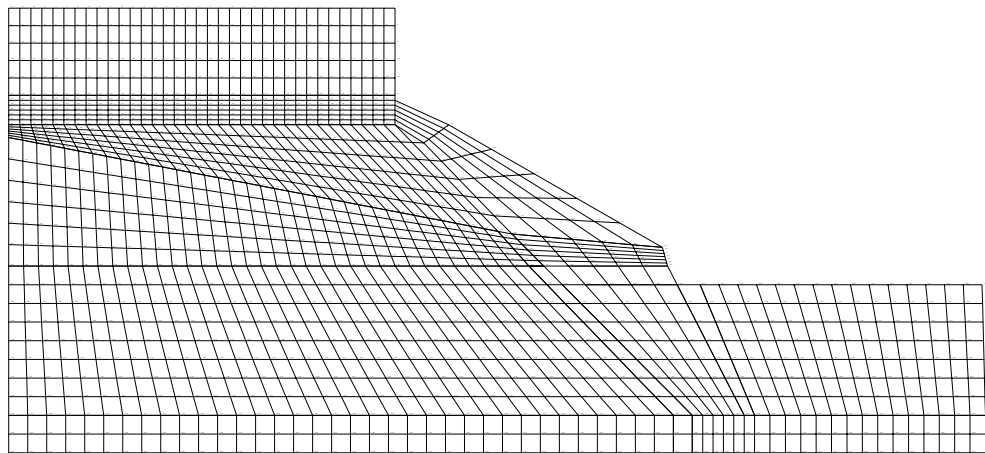


Рис. 8. Исходный граф откоса

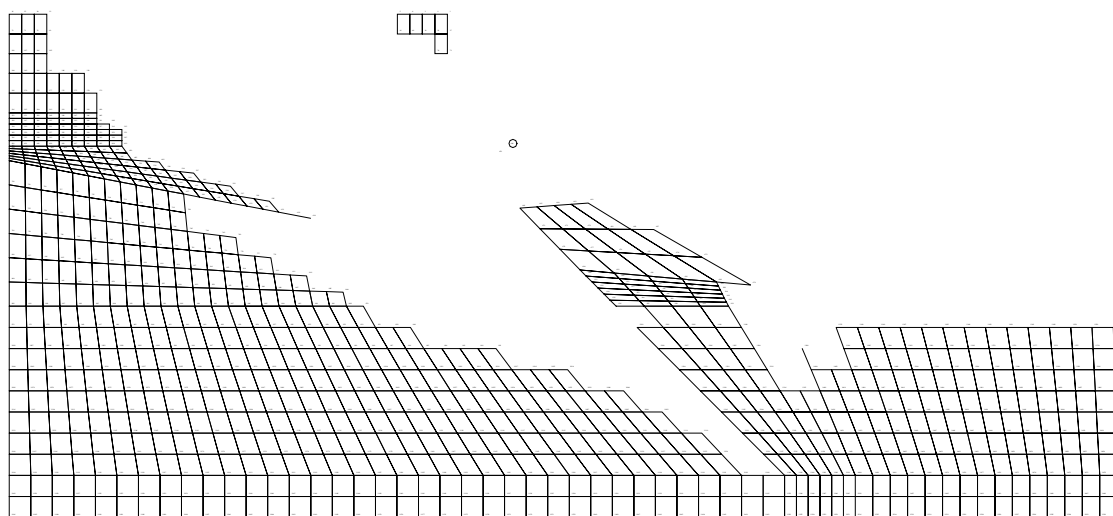


Рис. 9. Текущий граф откоса, соответствующий моменту потери устойчивости откоса

Во втором случае КУ отличается на 7% в большую сторону, что согласуется с тем, что метод «круглоцилиндрических поверхностей скольжения» формирует некоторый запас прочности.

В ходе дальнейших наблюдений за откосом зафиксировано обрушение бровки и появление языка оползня по мере постепенного оттаивания грунта.

Необходимо отметить, что после проведенных расчетов и анализа полученных результатов инженеры – проектировщики организации «Башпромстройпроект» совместно с профессором кафедры «Технология строительного производства и фундаменты», д.т.н. Гончаровым Б.В. выполнили расчеты возведенной части монолитной железобетонной стены гаража как подпорной стенки. Был выполнен расчет на динамическое действие объема грунта (рис. 11, поз. 2), ограниченного вертикальной стенкой откоса, при внезапном обрушении. Расчеты показали, что прочность стены обеспечена. Это позволило отказаться от вариантов мероприятий по обеспечению устойчивости откоса, а подрядчику - продолжить строительные-монтажные работы.

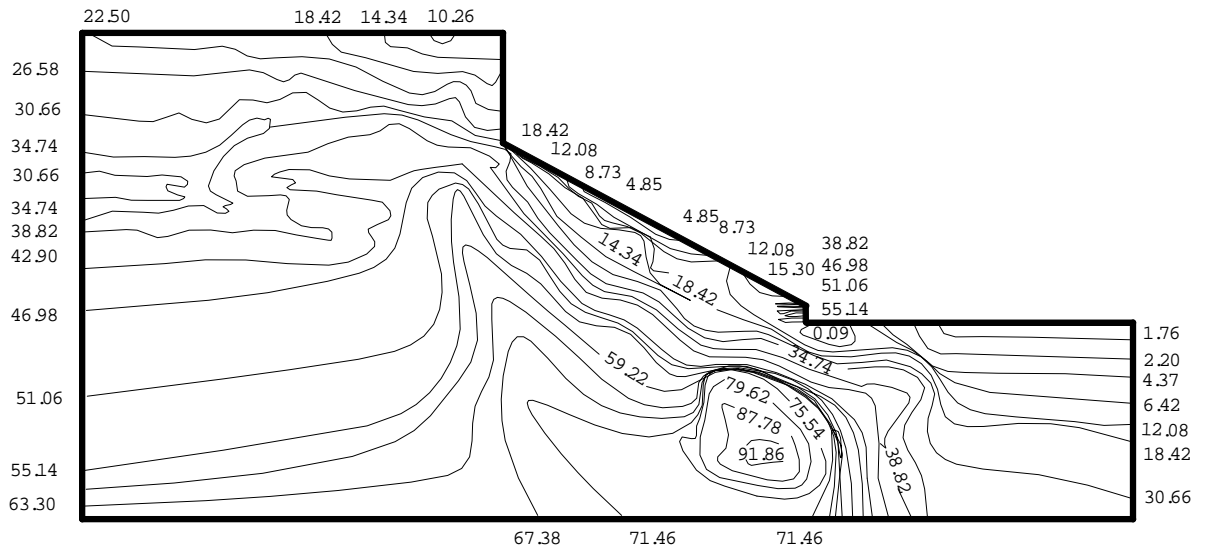


Рис. 10. Изолинии касательных напряжений, КПа

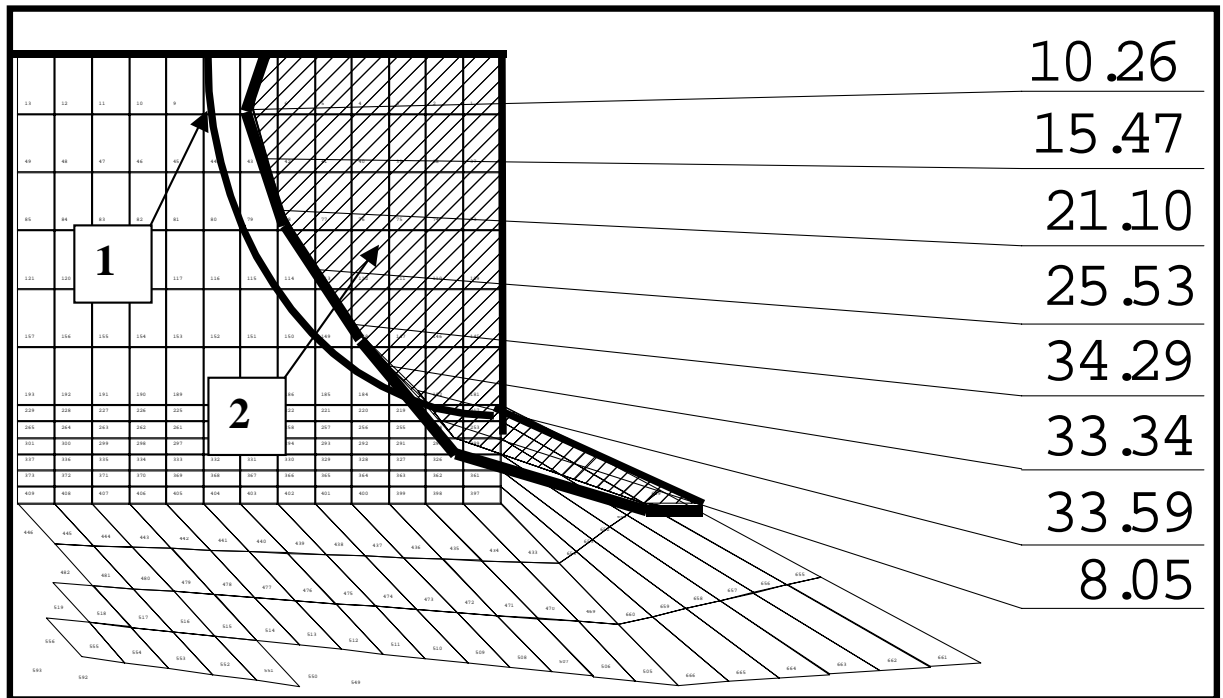


Рис. 11. Оползне-опасный массив откоса, значения касательных напряжений в КПа: 1 - круглоцилиндрическая поверхность скольжения; 2 – призма обрушения по предложенному методу

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных в работе исследований разработан метод численного расчета устойчивости откосов (склонов), основанный на применении теории графов.

2. Разработана математическая модель «граф-откос», которая отражает состояние (устойчивость откоса) расчетной схемы на любом шаге итерации, а произвольные изопараметрические четырехугольные КЭ позволяют моделировать откосы и склоны практически любых очертаний поперечного профиля.

3. Разработан алгоритм поиска цепи в модели «граф-откос» между помеченными вершинами и критерий определения устойчивого откоса (склона).

4. Разработана методика определения момента потери устойчивости откоса при помощи теории графов, что в численных методах используется впервые; кроме того, это позволяет определить НДС откоса в момент исчерпания несущей способности и выявить «призму обрушения грунта», что имеет практическое значение при проектировании удерживающих конструкций.

5. Разработан программный комплекс, позволяющий задать расчетную схему откоса; определить НДС массива с учетом упругопластических деформаций грунта; с помощью модели «граф-откос» и правил теории графов определить устойчивость откоса (склона).

6. Выполнена апробация предложенного метода на примерах расчета и на реальном откосе при строительстве двухэтажных подземных гаражей в квартале №570 Кировского района города Уфы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Незамутдинов Ш.Р., Шайхуллин И.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния откосов. // Материалы 5 Международной конференции при 5 Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2001». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – С. 63-64.
2. Незамутдинов Ш.Р., Шайхуллин И.Р. Программная реализация на ЭВМ методики расчета откосов и склонов по напряженно-деформированному состоянию. // Материалы 5 Международной конференции при 5 Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2001». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – С. 64.
3. Незамутдинов Ш.Р., Шайхуллин И.Р., Тростинская Ж.В. Численное моделирование оползневых процессов от приложенной на склон нагрузки. // Материалы 6 Международной конференции при 6 Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2002». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 131.
4. Хазиев А.З., Шайхуллин И.Р. Способы хранения графа-отображения откоса (склона) в памяти ЭВМ. // Материалы 6 Международной конференции при 6 Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2002». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 132.
5. Шайхуллин И.Р., Нургалиева Э.Д. Алгоритм поиска цепи в графе откосе и его оптимизация. // Материалы 6 Международной конференции при 6 Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство-2002». - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 132-133

Соискатель

Шайхуллин И.Р.