



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

---

## ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

Кафедра механики и математического моделирования

Абрамова Кристина Дмитриевна

Исследование устойчивости техногенных склонов на основе конечно-элементного моделирования

УТВЕРЖДЕНО  
Директор Инженерной школы

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика,  
профиль «Математическое и компьютерное моделирование механических систем и процессов»

Владивосток  
2018

Сведения, содержащих  
гос. тайну, нет  
Эксперт



А.А. Бочарова

Автор работы Нурмаева Л.В.  
(подпись)  
« 04 » 07 2018 г.

Консультант(ы)\*

\_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Руководитель ВКР профессор В.И.  
(должность, учёное звание)  
 В.И. Проф  
(подпись) (И.О. Фамилия)

« 14 » июля 2018 г.

Защищена в ГЭК с оценкой отлично

Секретарь ГЭК

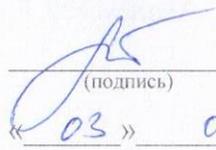


А.А. Ратников

« 04 » июля 2018 г.

«Допустить к защите»

Заведующий кафедрой, доцент



А.А. Бочарова

« 03 » 07 2018 г.

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Инженерной школы

 Беккер А.Т.  
Подпись Ф.И.О.  
« 18 » июля 2018 г.

В материалах данной выпускной квалификационной работы не  
содержатся сведения, составляющие государственную тайну,  
и сведения, подлежащие экспортному контролю.

Уполномоченный по экспертному контролю

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г.  
Ф.И.О. Подпись



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**Кафедра механики и математического моделирования**

Абрамова Кристина Дмитриевна

Исследование устойчивости техногенных склонов на основе конечно-элементного  
моделирования

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика,  
профиль «Математическое и компьютерное моделирование механических систем и  
процессов»

Владивосток  
2018

Автор работы \_\_\_\_\_

(подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Консультант(ы)\*

\_\_\_\_\_ (подпись)

\_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_

(должность, учёное звание)

\_\_\_\_\_ (подпись)

\_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Защищена в ГЭК с оценкой \_\_\_\_\_

Секретарь ГЭК

\_\_\_\_\_ (подпись)

А.А. Ратников

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

«Допустить к защите»

Заведующий кафедрой, доцент

\_\_\_\_\_ (подпись)

А.А. Бочарова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Моделирование проблем осыпания откосов и методы расчетов устойчивости.....	6
1.1 Понятие техногенных откосов .....	6
1.2. Математическая модель осыпания .....	7
1.3. Определение коэффициента устойчивости.....	10
1.4. Прогнозирование устойчивости откосов .....	12
1.5 Критерии оценки устойчивости .....	15
Глава 2. Конечно-элементное моделирование задачи устойчивости .....	25
Заключение.....	36
Литература.....	37
Приложение.....	38

## Введение

Строительство в современном мире характеризуется количественным и качественным ростом. Надёжность построек зависит от устойчивости оснований, на которых они возводятся. В Приморском крае стоит острая проблема дефицита площади застроек. Из-за горного ландшафта в качестве оснований часто используют откосы и склоны, которые подвержены потере устойчивости. Большую опасность представляют оползни и обвалы для всех видов инженерных сооружений: для зданий, промышленных объектов, железнодорожных линий, автомобильных дорог, особенно расположенных на берегах рек и склонах.

В связи с этим актуальной задачей является изучение способов расчета устойчивости откосов и склонов.

Целью данной выпускной квалификационной работы является применение методов конечно-элементного анализа к моделированию напряжённо – деформированного состояния, а также определение факторов, оказывающих влияние на устойчивость откосов техногенного характера.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- Обзор различных моделей устойчивости для определения влияния основных факторов;
- Анализ метода конечных элементов на базе программного комплекса ANSYS Mechanical APDL;
- Анализ метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения;
- Выполнение локальной оценки и прогноз устойчивости склона количественными методами;
- Установление взаимосвязи коэффициента запаса устойчивости склона с пластическими деформациями.

Объектом исследования данной работы являются модели устойчивости техногенных склонов в зависимости от физико – механических свойств грунтов.

В качестве предмета исследования выступают методы определения коэффициентов запаса устойчивости склонов, основанные на конечно-элементном моделировании.

# Глава 1. Моделирование проблем осыпания откосов и методы расчетов устойчивости

## 1.1 Понятие техногенных откосов

В данной работе рассматривается проблема устойчивости откосов. В практике инженерных исследований откосных сооружений принята следующая классификация:

1. Природные склоны;
2. Техногенные откосы.

Откосы природного характера называются склонами, техногенные откосы – карьеры, котлованы, траншеи, которые возникают в результате горных, строительных работ и техники.

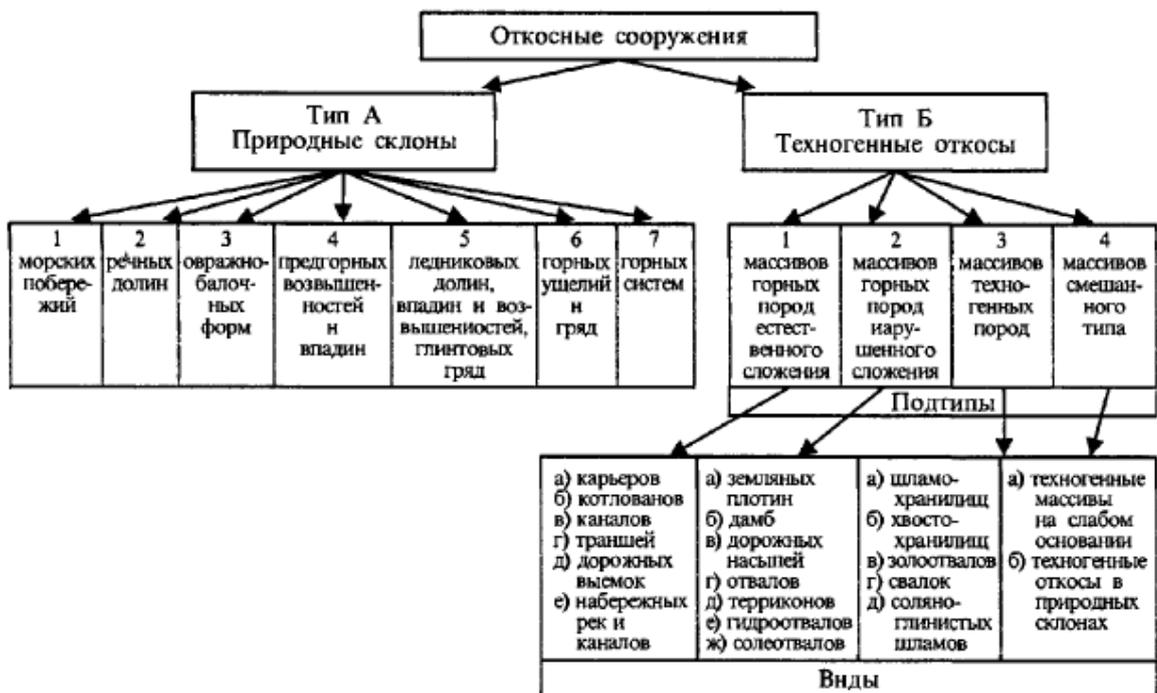


Рис.1. Классификация откосных сооружений

Настоящая работа имеет цель разработать научные основы и методы прогнозирования устойчивости склонов под действием естественных процессов – в основном гравитации. И инженерной защиты территорий, зданий и

сооружений от опасных процессов, вызванных техногенным или сейсмическими воздействиями.

Перемещение обломков горных пород происходит сверху вниз под действием силы тяжести. Этот процесс называется гравитационным.

Под действием различных природных и техногенных процессов происходит потеря устойчивости склонов, что является главной причиной возникновения гравитационных процессов.

При гравитационном переносе материал может перемещаться разными способами: падение, скатывание и скольжение отдельных обломков по крутым склонам.

Разрушение горных пород является основой гравитационных процессов, которое происходит в верхней части склона при перемещении разрушенного материала вниз по склону и накоплении массы горных пород у его подножия.

Гравитационные процессы осуществляются с разной скоростью. Некоторые происходят очень быстро, например, обвалы и камнепады, а другие протекают медленно. Помимо гравитации, большую роль в гравитационных процессах играют подземные и поверхностные воды.

## **1.2. Математическая модель осыпания**

По механизму движения в разных породах различают несколько видов гравитационных явлений:

### **1. Осыпание.**

Под осыпанием понимают быстрое перемещение обломков горных пород мелкого и среднего размера по крутому склону. Среди механизмов осыпания различают падение, скатывание и скольжение обломков.

Говоря о математической модели осыпания, рассмотрим частицу грунта на поверхности откоса при условии, что сцепление полностью отсутствует (идеально сыпучий грунт).

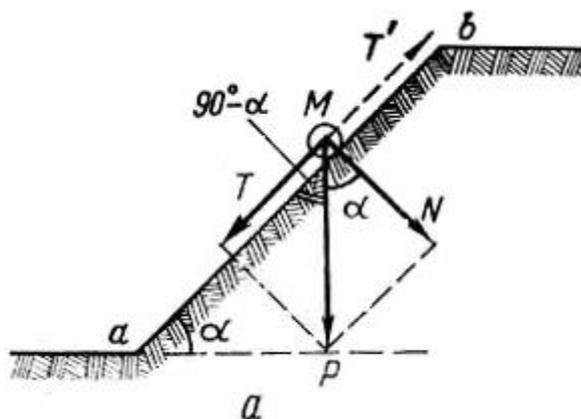


Рис. 2. Действие сил на частицу откоса при отсутствии сцепления

Условие равновесия на расчётной схеме (рис.2) будет иметь вид:

$$T = T',$$

где  $T$  – сила, сдвигающая частицу вниз (наклонная составляющая веса частицы  $P$ );

$T'$  – сила, сдерживающая частицу на откосе (сила трения)

при этом,

$$T = P \sin \alpha$$

$$T' = f N = f P \cos \alpha ,$$

где  $f$  – коэффициент трения для идеально сыпучих грунтов (модель идеально сыпучего грунта, при условии, что  $c=0$ ) равен  $\operatorname{tg} \varphi$ , т.е.

$$f = \operatorname{tg} \varphi .$$

Подставим в условие равновесия найденные соотношения, получим:

$$P \sin \alpha = f P \cos \alpha .$$

После сокращений получаем:

$$\sin \alpha = f \cos \alpha .$$

Выразив  $f$ , и подставив значение в равенство, получаем, что

$$\alpha = \varphi . \quad (1)$$

Таким образом:

*Предельный угол заложения откоса для идеально сыпучих грунтов  $\alpha$  равен углу внутреннего трения  $\varphi$ .*

Следует отметить, что, если песчаные грунты обладают хоть небольшим сцеплением ( $c \neq 0$ , где  $c$  – прочностная характеристика, определяемая как сопротивление структурных связей нескальных грунтов любому перемещению связываемых ими частиц), уравнение (1) даст заниженное значение предельного угла заложения. Наличие сцепления между частицами грунта делает устойчивее по сравнению с уравнением (1).

Рассмотрим осыпание при условии, что песчаные грунты обладают небольшим сцеплением ( $c \neq 0$ ). Условия равновесия такого осыпания будут определяться уравнением:

$$T = N \operatorname{tg} \varphi + cL,$$

где  $T$  – составляющая силы тяжести (общего веса пород ( $P$ ), слагающих оползень), стремящаяся сдвинуть оползень,  $T = P \sin \alpha$ ;  $N$  – составляющая силы тяжести, стремящаяся удержать оползень в равновесии,  $N = P \cos \alpha$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = f$  – расчетный коэффициент внутреннего трения пород;  $c$  – удельное сцепление пород;  $L$  – длина поверхности скольжения;  $\alpha$  – угол наклона поверхности скольжения.

## 2. Обвалы.

Под обвалом понимают отрыв и обрушение больших масс горных пород, их опрокидывание, дробление и перемещение на крутых ( $\alpha > 80^\circ$ ) и обрывистых склонах.

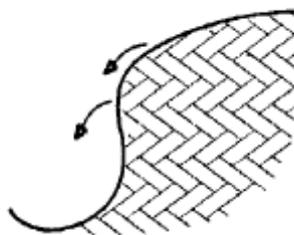


Рис.2. Обвал склона

## 3. Оползень.

Оползень – это процесс соскальзывания блока горных пород вниз по склону или откосу по поверхности скольжения под действием гравитационных

сил (вес пород, давление воды, сейсмическое воздействие, техногенные нагрузки).

Оползшую массу называют оползневым телом (или оползневым блоком). Оползневое тело может иметь форму удлиненного холма или вытянутой параллельно склону гряды холмов (линейные оползни). В процессе оползания первоначально монолитный блок пород дробится, сминается, вплоть до превращения в бесструктурную массу; при этом в тыловой части тело оползня менее разрушено.

Характер поверхности скольжения зависит от геологического строения склона или откоса. Поверхность скольжения может быть, как круглоцилиндрической, так и состоящей из нескольких пересекающихся плоскостей и поверхностей.



Рис.3. Оползень склона.

### 1.3. Определение коэффициента устойчивости

Основным количественным показателем при оценке и прогнозе устойчивости склонов, является коэффициент устойчивости (коэффициент запаса устойчивости), представляющий собой отношение сумм удерживающих и сдвигающих сил (или отношение моментов тех же сил), действующих по поверхности предполагаемого смещения оползневого тела.

$$K_{уст} = \frac{\sum \text{уд. силы}}{\sum \text{сдв. силы}} = \frac{\sum fN + cL}{\sum T},$$

где  $T$  – составляющая силы тяжести (веса пород  $P$ ), стремящаяся сместить горные породы;  $N$  – составляющая силы тяжести, стремящаяся удержать породы в равновесии;  $f$  – расчетный коэффициент внутреннего трения пород ( $f = \text{tg } \varphi$ , где  $\varphi$  - угол внутреннего трения);  $c$  – расчетное сцепление пород, тс/ м<sup>2</sup>;  $L$  – длина поверхности скольжения, м.

При  $K_{уст.} > 1$  склон находится в устойчивом состоянии, при  $K_{уст.} < 1$  – т.е. когда нарушается равновесие сил, - происходит гравитационное смещение.

Расчеты устойчивости склона выполняются по инженерно-геологическим разрезам (которые в дополнение к геологическому строению содержат информацию об инженерных сооружениях), ориентированным по наиболее вероятным направлениям развития оползневого процесса, и сводятся к решению плоской задачи – рассматривается створ (профиль) – полоса склона шириной 1 м (рис.4).

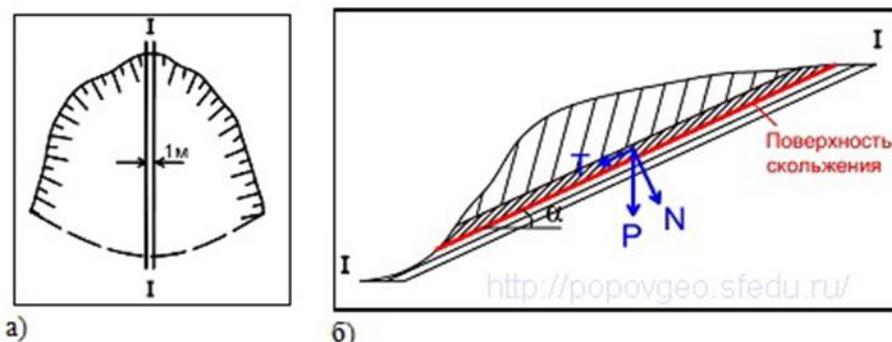


Рис.4. Положение расчетного профиля на оползневом участке (а); расчетный профиль по линии I-I (б).

Количественную оценку устойчивости оползневых склонов следует производить, опираясь на типизацию оползней по механизму оползневого процесса и с учетом факторов, влияющих на нарушение устойчивости рассматриваемого склона.

Склон характеризуется определенными внешними параметрами (высотой, наклоном, профилем, наличием растительности) и внутренним строением

(горными породами, подземными водами, полезными ископаемыми). Строение объекта может природным, техногенным или комбинированным.

Таким образом, объект, в котором возникает оползень, может быть охарактеризован двумя категориями условий – геоморфологическими и геологическими.

Оползневой процесс возникает и развивается при наличии различных условий гравитационных процессов. Происходит это при нарушении равновесия сил, стремящихся разрушить массив горных пород, и противостоящих им сил сопротивления. Более опасными являются высокие и крутые склоны, но предельно устойчивая высота  $h$  зависит от угла наклона  $\alpha$  склоновой поверхности. Существует много графиков зависимости  $\alpha=f(h)$  для различных склонов и откосов, где  $\alpha$  – угол наклона склоновой поверхности, а  $h$  – высота склона.

**Таблица 1. Изменение коэффициента устойчивости склона постоянной высоты от угла его наклона**

Угол наклона $\alpha$ , град	45.00	36.67	26.51	21.80	18.42	14.00
Коэффициент устойчивости	0.35	0.53	0.72	0.91	1.11	1.52

**Таблица 2. Изменение коэффициента устойчивости склона постоянного угла наклона от его высоты**

Высота склона $h$ , м	11	14	17	20	22	34	75
Коэффициент устойчивости	2.00	1.50	1.38	1.26	1.00	0.90	0.72

#### **1.4. Прогнозирование устойчивости откосов**

При оценке устойчивости техногенных откосов появляется необходимость составлять прогноз возможности образования оползней. Зная факторы развития оползневых процессов, можно предвидеть их образование.

Факторы оползневого процесса – это вспомогательные процессы, воздействие которых на геологическую среду приводит к развитию и проявлению оползня.

По характеру воздействия и результатов оползневого процесса делят на 2 группы: 1) влияющие на прочность и деформируемость; 2) изменяющие напряженное состояние приоткосного массива горных пород.



Рис. 5. Схема I группы техногенных факторов.



Рис. 6. Схема II группы техногенных факторов.

Оползень характеризуется двумя группами факторов, которые изменяют свойства горных пород склона и их напряженного состояния, и как следствие, реализуется как оползневое явление под воздействием одного из факторов.

Под прогнозированием понимают целый комплекс работ, нацеленных на решение таких задач, как: возможность возникновения оползневого процесса; вид, место и время его появления; динамика развития процесса; интенсивность и масштаб процесса; степень риска и т.д.

### **Прогноз разделяют по нескольким признакам:**

- 1) По времени прогнозирования;
- 2) По степени достоверности;
- 3) По масштабу хваченных объектов;
- 4) По модели прогнозирования.

### **Методы прогнозирования:**

1. Методы прогнозного картирования;
2. Методы аналогий;
3. Методы определения частоты возникновения;
4. Моделирование эквивалентными материалами;
5. Вероятностно – статистические методы;
6. Методы физического и математического моделирования;
7. Расчетные методы определения коэффициента устойчивости склонов;
8. Метод конечных элементов;
9. Методы симптомов;
10. Расчетные методы оценки скорости смещения.

### **Расчетные методы прогнозирования:**

- 1) Определение степени устойчивости склонов и откосов при расчете коэффициента устойчивости  $K_{уст.}$ , как функция геометрических параметров и показателей прочности и плотности  $K_{уст.}=f(h, \alpha, \varphi, c, \gamma)$ .
- 2) Определение параметров проектируемых откосов ( $h$  и  $\alpha$ ) при известных геологических и гидрологических условиях и требований безопасности в определенных техногенных ситуациях.
- 3) Определение показателей сопротивления сдвигу в зоне скольжения, учитывая геометрические параметры склона в момент проявления нарушения устойчивости.

## 1.5 Критерии оценки устойчивости

### Теория прочности Кулона – Мора

Механизм оползневого процесса на склонах и откосах определяется видом, способом и характером перемещения одной части пород относительно другой. Знание типа механизма оползня дает большие возможности прогноза его динамики и последствий, выбора расчетных моделей и показателей сопротивления сдвигу, для мероприятий инженерной защиты. Так же прогнозы имеют большое значение при изучении устойчивости техногенных откосов.

Грунты в основании сооружений испытывают воздействие как нормальных, так и касательных напряжения. Когда касательные напряжения по какой-либо поверхности в грунте достигают его предельного сопротивления, происходит сдвиг одной части массива грунта по другой.

Критерий прочности Кулона – Мора основан на предположении, что прочность материала в общем случае напряженного состояния зависит главным образом от величины и знака наибольшего  $\sigma_1$  и наименьшего  $\sigma_3$  главных напряжений. Исходя из этого предположения любое напряженное состояние можно представить одним кругом Мора, построенным на главных напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

Критерий прочности представляет собой билинейную зависимость касательных напряжений материала от величины приложенных нормальных напряжений. Зависимость представлена как:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где  $\tau$  – величина касательных напряжений,  $\sigma$  – величина нормальных напряжений,  $c$  – сцепление,  $\operatorname{tg} \varphi$  – тангенс угла наклона кривой критерия прочности,  $\varphi$  называют углом внутреннего трения.

В соответствии с выражением закона Кулона – Мора рассматривают сопротивление сдвигу хрупких пород как:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c_1 + c_2,$$

где  $c_1$  – первичное сцепление структурных связей,  $c_2$  – вторичное сцепление цементационных связей.

При сопротивлении сдвигу текучепластичных пород  $c_2=0$ .

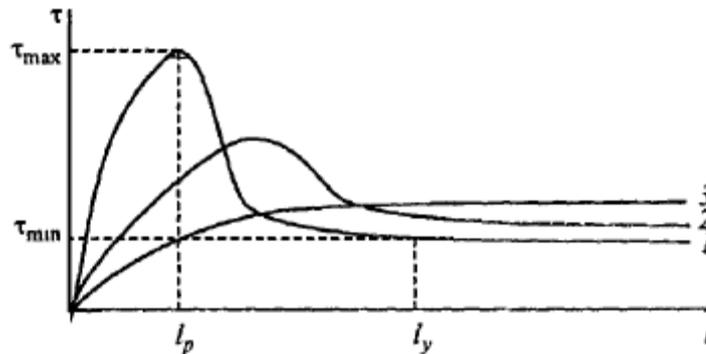


Рис.7. Кривые сдвига для глин.

1 – плотные глины; 2 – средней плотности; 3 – пластичные.

### Условие пластичности (текучести) Мизеса

Свойство твердого тела изменять свою форму и размеры, при это не разрушаясь, и сохраняя остаточные деформации называется пластичностью.

При решении задач теории пластичности (текучести) следует знать условия, при которых материал будет переходить из упругого состояния в пластическое. Такие условия называют условиями пластичности.

При линейном напряженном состоянии пластические деформации возникают, когда

$$\sigma_1 = \sigma_T; \sigma_2 = \sigma_3 = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести при растяжении (определенная постоянная величина для определенного материала).

При чистом сдвиге условие пластичности (текучести) имеет вид

$$\tau = \tau_T,$$

где  $\tau_T$  – предел текучести при чистом сдвиге (также, как и с пределом текучести).

Рассмотрим условие пластичности (текучести) Мизеса, которое используется чаще всего. Данное условие гласит, что пластические деформации

в материале возникают, когда интенсивность касательных напряжений достигает некоторого постоянного значения:

$$\tau_i = C. \quad (3)$$

Определим это постоянное значение из результатов испытаний при простом растяжении, подставив в формулу второго инварианта девиатора напряжений главные напряжения (2), и найдя значение интенсивности касательных напряжений при растяжении в момент появления пластических деформаций:

$$\tau_i = \sigma_T \frac{\sqrt{2}}{3}$$

Сравнивая формулы, получаем, что интенсивность касательных напряжений достигает значения равного

$$C = \sigma_T \frac{\sqrt{2}}{3}, \quad (4)$$

Подставляя выражения второго инварианта девиатора напряжений и (4) в формулу (3), приходим к условию пластичности Мизеса:

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2} / \sqrt{2} = \sigma_T. \quad (5)$$

Условие пластичности Мизеса дает значения весьма близкие к экспериментальным результатам.

### **Метод Н.Н. Маслова для определения оценки устойчивости откосов (Метод равнопрочного откоса)**

Метод Маслова считается одним из приближенных методов. Также его называют методом равнопрочного откоса. Равнопрочный откос – это такой откос, у которого в любом горизонтальном сечении гарантирована устойчивость слагающих его горных пород, т.е.

$$K_{уст} = \operatorname{tg}\psi / \operatorname{tg}\alpha = 1,$$

где  $\alpha$  – угол наклона откоса в пределах горизонта горных пород;

$\psi$  – угол сопротивления сдвигу горизонта пород при нормальном напряжении  $\sigma$ .

Угол сопротивления горных пород сдвигу определяют уравнением

$$F = \operatorname{tg}\psi = \tau/\sigma = \operatorname{tg}\varphi + c/\sigma,$$

где  $F = \operatorname{tg}\psi$  – коэффициент сдвига горных пород при нормальном напряжении  $\sigma$ ;  $\tau$  – сдвигающее усилие;  $\sigma$  – нормальное уплотняющее напряжение;  $c$  – сцепление.

Коэффициент сдвига на любой глубине  $Z$  в откосе, где действуют напряжения от собственного веса горных пород:

$$F = \operatorname{tg}\varphi + c/\gamma Z,$$

где  $\gamma$  – средняя плотность горных пород от поверхности земли до глубины  $Z$ .

Для равнопрочного откоса на каждом  $i$ -том горизонте  $Z_i$  угол наклона откоса в пределах рассматриваемого горизонта  $\alpha_i$  численно должен быть равен углу сопротивления сдвигу  $\psi$  пород.

Таким образом, если известен угол сопротивления сдвигу горных пород каждого  $i$ -того горизонта, слагающих откос, и учитывается распределение напряжений от собственного веса пород, можно наметить очертание устойчивого откоса.

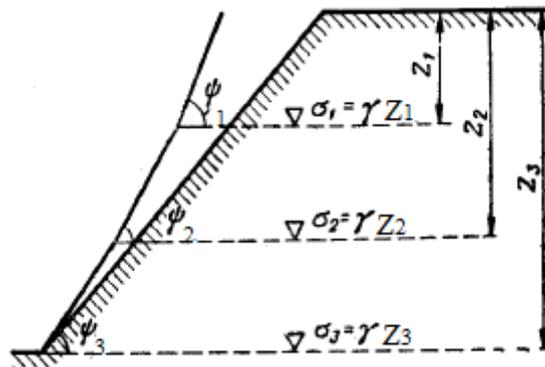


Рис. 8. Схема оценки устойчивости откоса по Маслову.

На рисунке 8 видно, что выделены 3 слоя со своими характеристиками. По значениям углов сдвига пород намечено очертание устойчивого откоса. Так как реальный откос положе предельно устойчивого, то он устойчив.

### Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения применяется для оценки устойчивости откосов и склонов, и является наиболее

распространённым среди других методов расчета. Данный метод базируется на данных о форме поверхности скольжения при оползневом процессе, самое невыгодное положение этих поверхностей определяется расчетом.

Расчет данным методом заключается в определении коэффициента устойчивости склона или откоса при наиболее опасном расположении поверхности скольжения.

Рассмотрим этот метод с помощью рис.9. Расчетная схема предполагает перемещение объема однородных пород ( $\varphi=\text{const}$ ,  $c=\text{const}$ ,  $\gamma=\text{const}$ ) в виде жесткого клина вниз по круглоцилиндрической поверхности скольжения, которая может проходить с захватом основания или без него.

Предполагается, что откос теряет устойчивость при вращении грунтового массива относительно некоторого центра  $O$ .

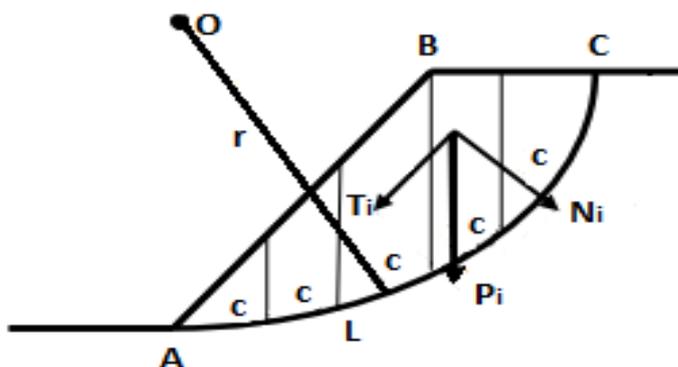


Рис. 9. Схема к расчету устойчивости откоса методом алгебраического суммирования сил по круглоцилиндрической поверхности без захвата основания.

Порядок вычислений:

- 1) откос делим на призмы;
- 2) определяем вес каждой части – призмы –  $P_i$ ;
- 3) раскладываем  $P_i$  на  $T_i$  и  $N_i$ ;
- 4) находим  $c$  и  $L$ (длина дуги скольжения).

Перемещение происходит в виде вращения под действием сдвигающего момента:

$$M_{сд} = \sum_{i=1}^n r T_i,$$

где  $n$  - число призм.

Моменту сдвига противодействует удерживающий момент

$$M_{уд} = r \left( \sum_{i=1}^n F_i + cL \right),$$

где  $\sum F$  – сумма сил трения по поверхности скольжения;  $c$  – удельное сцепление;  $L$  – длина дуги скольжения радиуса  $r$  и  $F_i = N_i \operatorname{tg} \varphi$ .

Для условий предельного равновесия  $M_{сд} = M_{уд}$  или  $\frac{M_{уд}}{M_{сд}} = K_{уст} = 1$ , или

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \operatorname{tg} \varphi r + cLr}{\sum_{i=1}^n T_i r} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \operatorname{tg} \varphi + cL}{\sum_{i=1}^n T_i}.$$

Для расчета данным методом соблюдается лишь одно условие – сумма моментов. Проекция же сил на две оси не проверяются.

Необходимо найти наиболее опасный центр вращения, где  $K_{уст} = \min$ , т.е. наиболее вероятную поверхность обрушения. Центры вращения в точке  $O$  располагаются на одной линии под углом  $36^\circ$  на расстоянии  $0,3 h$ .

Для точек  $O_1, O_2, O_3, O_4, \dots$  – строим поверхности скольжения – определяем  $K_{уст1}, K_{уст2}, K_{уст3}, K_{уст4}, \dots$  – откладываем их в масштабе, соединяем и графически находим минимальный  $K_{уст}$ , при котором поверхность обрушения является наиболее опасной.

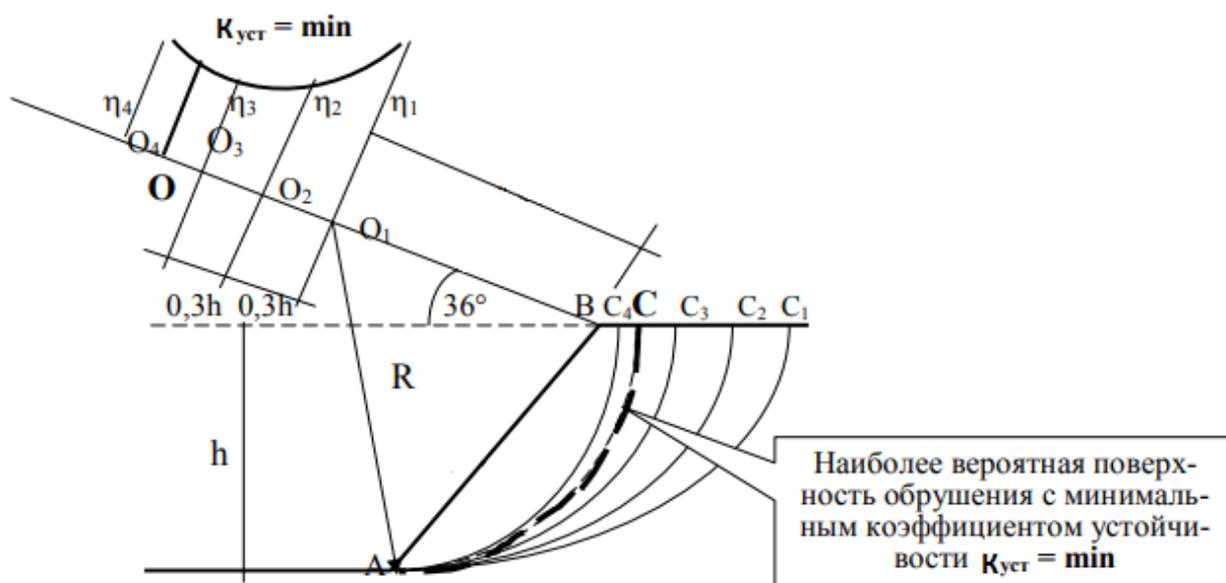


Рис. 10. Графическое нахождение наиболее вероятной поверхности обрушения.

### Расчет площадки методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения при помощи SCAD Office 11.5 Откос

Реальная поверхность скольжения откоса является трёхмерной. Но в программе ОТКОС принимается гипотеза о не учете пространственности – величина коэффициента устойчивости идёт в запас.

В основе алгоритма расчета программы ОТКОС лежит методика, предложенная в работах В.Г.Федоровского и С.В.Курилло, которая основана на методе переменной степени мобилизации сопротивления сдвигу (МПСМ). Кроме того, в программе реализован классический метод – упрощённый метод Бишопа.

#### Занесение исходных данных

На странице общих данных задаются размеры оползневого участка склона. В основном это четыре числа:  $r_1, r_2$  – определяют интервал изменения допускаемых значений абсцисс начала оползня, и аналогичные данные для конца оползня —  $r_3, r_4$ .

На странице грунтов задаются характеристики: угол внутреннего трения, удельное сцепление, удельный вес сухого грунта, удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии.

На странице со скважинами задаются границы слоёв каждого грунта, отмечается уровень грунтовых вод, задаётся название скважины.

На странице нагрузок задаются действующие напоры. Так как рассматривается двумерная задача, нагрузки задают на погонный метр ширины откоса. Эти нагрузки аппроксимируются кусочно-линейными функциями координаты  $x$ , и для удобства описания привязываются к скважинам.

Так же существует возможность рассчитать коэффициент запаса устойчивости с учетом сейсмического воздействия. Для этого задаётся значение сейсмичности в баллах.

#### Расчёт и отображение результатов

Расчет включает в себя начальное приближение и вычисление коэффициента запаса устойчивости. Поверхность скольжения выводится на отдельной странице на разрезе склона (рис.11).

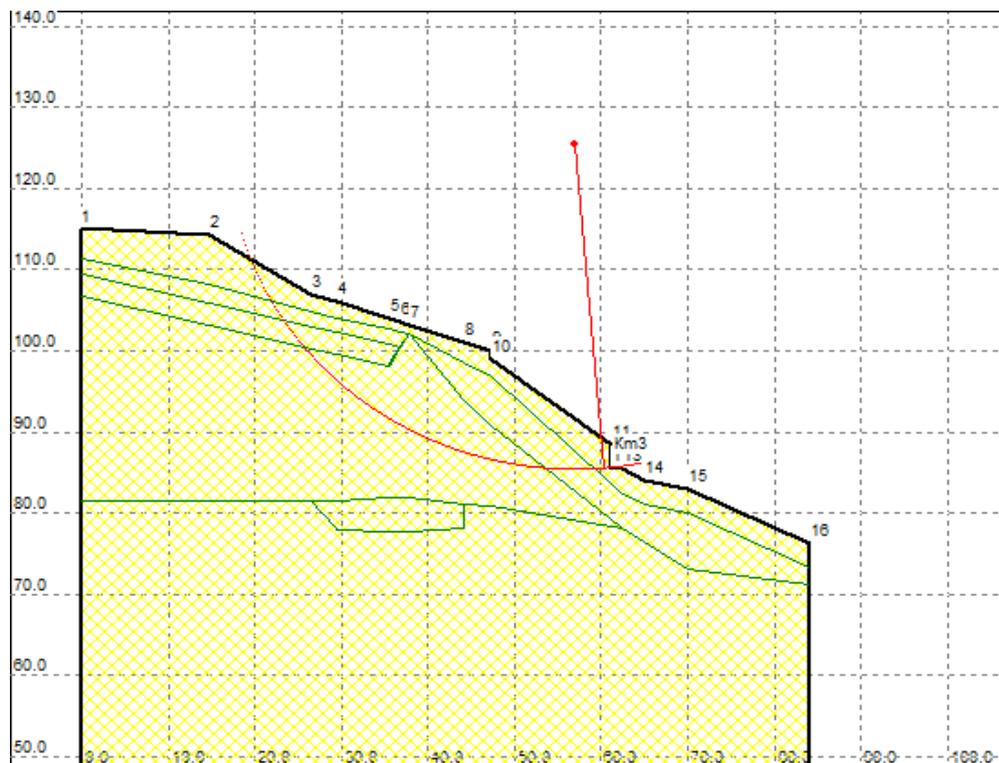


Рис. 11. Результирующая поверхность скольжения SCAD Office 11.5 Откос

## **Метод конечных элементов в механике грунтов**

Механику грунтов относят к строительной дисциплине. Предметом изучения МГ являются грунты, а также процессы их взаимодействия со зданиями и сооружениями. На разных территориях грунт имеет различные неповторимые свойства.

Прочность грунтов, по сравнению с конструкционными материалами, во много раз меньше. Деформируемость же, наоборот, больше. Неправильный анализ свойств грунтовых массивов ведёт к разрушению, а порой и обрушению зданий при использовании. Из этого следует, что исследование физико – механических свойств грунтов очень важно, а также необходим поиск наилучшего метода расчета грунта на устойчивость.

Существует несколько методов расчета грунта. Самыми современными считаются численные, среди которых наибольшее применение в механике грунтов получил метод конечных элементов. Данный метод позволяет моделировать поведение грунтовых массивов на основе математических моделей во взаимодействии с сооружениями с учетом особенностей и физико – механических свойств грунтов.

При решении задач методом конечных элементов грунтовый массив представляют в виде расчетной области, которая разбивается на несколько подобластей. В свою очередь эти подобласти называют конечными элементами, которые могут быть представлены в виде треугольников или четырехугольники. В таких конечных элементах выделяются точки, которые называются узловыми точками или узлами. В основном, узлы располагают в вершинах элементов. Но при увеличении количества узлов их можно располагать не только в вершинах, но и по сторонам. Для каждого элемента определяется свой полином. Полиномы подбираются так, чтобы непрерывность величины вдоль границ элемента сохранялась. При решении задач функционал, связанный с соответствующим дифференциальным уравнением, минимизируют.

МКЭ даёт возможность рассчитывать напряженно – деформированное состояние расчетной области при использовании модели линейного деформирования грунта.

Достоинства МКЭ:

1. метод конечных элементов не требует определенного количества итераций;
2. позволяет избежать задание формы поверхности скольжения.

Недостатки:

1. по результатам НДС откоса не определяют его устойчивость;
2. не позволяет выявить опасную поверхность скольжения;
3. НДС грунта на последнем шаге итераций не соответствует моменту перехода откоса в предельное состояние.

## Глава 2. Конечно-элементное моделирование задачи устойчивости

В качестве модельной задачи рассмотрим модель грунта, которой свойственны характеристики грунта на рассматриваемой территории (рис.12).

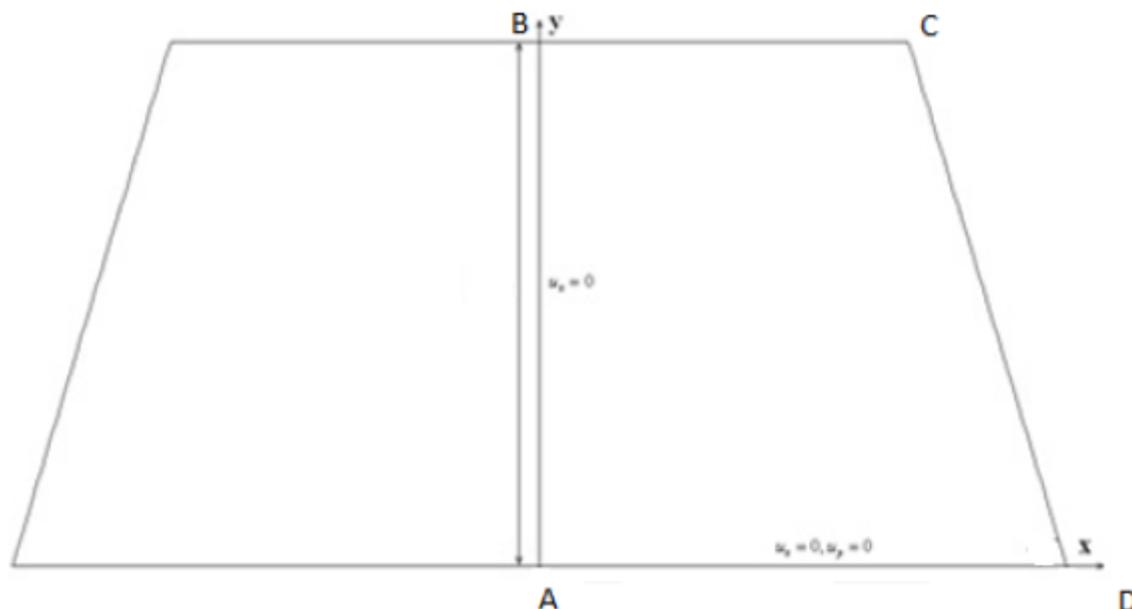


Рис. 12. Модель грунта.

Механические характеристики, которые присущи грунтам на рассматриваемой территории приведены ниже (табл.3).

Таблица 3. Механические характеристики грунтов рассматриваемой территории

ИГЭ	Плотность грунта, т/м <sup>3</sup>	Плотность насыщенного грунта, т/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, т/м <sup>2</sup>	
1	2.12	2.32	29.00	1.10	Насыпной грунт
2	1.95	2.20	22.00	2.30	Суглинок твердый
3	2.00	2.28	27.00	0.80	Щебенисто-дресвяный грунт
4	2.34	2.64	23.00	4.00	Риолит-порфиры малопрочные
4а	2.11	2.40	21.00	3.28	Риолит- порфиры очень низкой, низкой прочности (зона дробления)
6	2.55	2.74	27.00	12.00	Риолит-порфиры прочные

Воспользуемся характеристиками грунтов с ИГЭ-2, так как суглинок считается эталонным грунтом.

На площадке ИГЭ-2 дополнительными параметрами являются модуль Юнга  $E=25\text{МПа}$  и коэффициент Пуассона  $\mu=0,35$ .

Расчетная область состоит из половины насыпи – ABCD. На АВ принимается граничное условие  $u_x=0$ , а на основании  $u_x=0$  и  $u_y=0$ . Насыпь имеет высоту  $h$ . Отношение полуширины верхнего основания к полуширине нижнего равно  $\frac{BC}{AD} = 0.8$ . Высота насыпи равна полуширине верхнего основания, т.е.  $AB=AD=30\text{м}$ .

Расчет производится в ПИММ ANSYS Mechanical APDL (рис.13) при помощи типа элемента PLANE, который позволяет решать задачи плоскими конечными элементами, работающими в условиях плоской деформации.



Рис.13. Окно программы Mechanical APDL

Mechanical APDL является своеобразной базой данных, которая основана на написании программного кода с помощью специальных команд, которые работают, как правило, только в одном процессоре. Главными процессорами являются:

`/prepr7` – препроцессор, в котором формулируются элементы, свойства материалов и задаётся сетка.

/solu – процессор решателя, в котором задают нагрузки, граничные условия и параметры расчета.

/post1 – постпроцессор. В нём задаются свойства результатов, построение графиков.

Так же существует процессор FINISH, который используется, если нужно перейти в начало программы.

При решении задач в двухмерном пространстве используют тип элемента Plane категории Solid, который позволяет создавать и редактировать объект в плоскости. Например, команда Plane42 означает, что создаётся четырёхугольник с тремя узлами. Для элемента Plane существуют всего 2 опции решения задач механики деформируемого твёрдого тела: плоское напряжённое состояние и плоская деформация. Выбор опций зависит от типа плоских элементов, используемых в решаемой задаче.

### **Нелинейности поведения грунта**

В программе ANSYS могут воспроизводиться различные типы нелинейности, когда напряжения не связаны с деформациями линейной зависимостью.

При анализе пластического поведения требуется знание трёх критериев: условие начала текучести, закон течения и закон упрочнения. Условие начала текучести даёт возможность свести объёмное напряжённое состояние к эквивалентному напряжению. Для того, чтобы определить, происходит ли течение материала, эквивалентное напряжение сравнивается с пределом текучести.

На направление, в котором происходит деформирование, указывает закон течения. Как ведёт себя поверхность текучести с ростом деформаций в материале описывает закон упрочнения.

В программе ANSYS используются три условия начала текучести: Мизеса, Мизеса-Хилла и Друкера-Прагера в зависимости от модели пластического поведения материала.

Для описания горных пород, бетонов или грунтов используется **модель**

**Друкера – Прагера.** Для моделирования предела текучести материала при всестороннем давлении применяется условие текучести Мизеса, которое зависит от среднего давления. Закон течения может быть как ассоциированным, так и неассоциированным. Упрочнение отсутствует.

Условие текучести в общем виде

$$\phi = \sigma_{\text{eq}} - \sigma_T,$$

где  $\sigma_{\text{eq}}$  - скаляр, эквивалентное напряжение, вычисленное по компонентам тензора напряжений;  $\sigma_T$  - справочная величина, предел текучести. При  $\phi < 0$  материал остается упругим, при  $\phi = 0$  возникают пластические деформации.

Эквивалентные напряжения определяются по критерию Мизеса:

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\left( (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right) / 2}.$$

Текучесть появляется, когда выполняется условие  $\sigma_{\text{eq}} = \sigma_T$ , где  $\sigma_T$  - предел текучести при одноосном напряжении.

Если установлено, что условие текучести выполняется, тогда направление и величина пластических деформаций будут определяться законом течения. Закон течения в математической форме:

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \{ \partial Q / \partial \sigma \},$$

где  $\{d\varepsilon^p\}$  - приращение пластической деформации;  $Q$  - пластический потенциал, скалярная функция напряжений, указывающая направление деформирования;  $\lambda$  – согласующий множитель Лагранжа, который определяет величину деформации. Данный закон течения, используемый в ANSYS, является ассоциированным для всех условий текучести.

Поведение поверхности текучести определяется законом упрочнения при пластических деформациях материала.

### **Расчёт НДС при определённых коэффициентах запаса устойчивости**

Для решения задачи область расчета нагружается собственным весом, умноженным на коэффициент запаса устойчивости  $K_{\text{уст}}$ .

Коэффициент запаса устойчивости был рассчитан упрощенным методом А.В. Бишопа в программе SCAD Office 11.5 Откос, в которой требовалось задать характерные расстояния откоса, грунты и их свойства после бурения скважин, расстояния между скважинами, нагрузки, действующие на откос. В результате чего была построена модель откоса и автоматически рассчитан  $K_{уст}$ , который в последствии применяется в модельной задаче.

Кроме того, были предоставлены расчеты  $K_{уст}$  по методам «Весового давления» и К. Терцаги.

Помимо программы «Откос» существует множество других, например, RUZOBISH (ВНИИ ВОДГЕО, Харьковский ВКП), GALOSH (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева), разработанные в СССР или таких, как целый комплекс программ GEO5, который включает в себя модуль «Устойчивость откоса». А также есть ряд иностранных программ: REAME, SWASE и другие.

В работе исследуется влияние реальных коэффициентов запаса устойчивости на распространение пластических деформаций (по Мизесу).  $K_{уст}=1$  – минимальный коэффициент запаса устойчивости, при котором склон не разрушается;  $K_{уст}=1,15$  – коэффициент запаса прочности по [8] для рассматриваемой территории;  $K_{уст}=1,33$  – расчетный коэффициент запаса прочности по методу К. Терцаги;  $K_{уст}=1,45$  – расчетный коэффициент запаса устойчивости по методу «Весового давления»;  $K_{уст}=1,4$  – коэффициент запаса прочности, вычисленный в программе Откос по упрощенному методу Бишопа.

Для решения задачи МКЭ расчетную область представляем в виде сетки конечных элементов (рис.14).

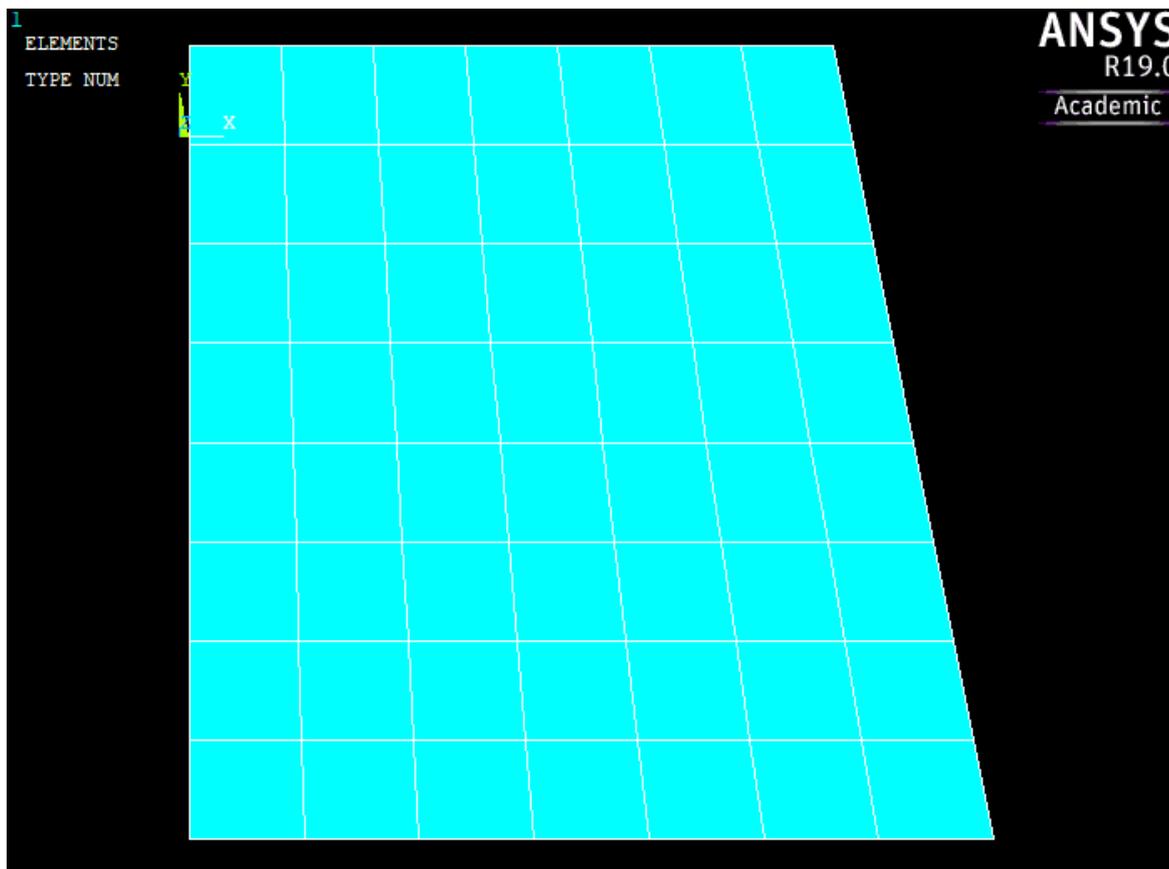


Рис. 14. Сетка конечных элементов.

Исследование проводится до тех пор, пока не нарушается устойчивость откоса. Такой способ позволяет получить напряжённо – деформированное состояние грунта, которое соответствует предельному состоянию откоса.

Напряжённо – деформированное состояние рассматривается для условий задачи плоской деформации, так как все откосы имеют большую протяженность.

Численный расчет напряжённо – деформированного состояния откоса не позволяет непосредственно определить момент потери устойчивости, но даёт возможность проконтролировать образование пластических деформаций.

### **Исследование влияния коэффициентов запаса устойчивости на техногенный откос с характеристиками суглинка.**

Исследования проводились для модели грунта с физико – механическими характеристиками свойственными твёрдому суглинку, а именно модуль

упругости  $E=25\text{МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\mu=0.35$ , угол внутреннего трения  $\varphi=22^\circ$  удельное сцепление  $c=22.555\text{КПа}$ , плотность грунта  $\rho=1950\text{ кг/м}^3$ . Геометрические параметры расчётной модели:  $AB=AD=30\text{м}$ ,  $\frac{BC}{AD} = 0.8$ . Коэффициент запаса устойчивости Куст. Варьировался от 1 до 1,45.

Результаты распространения пластических деформаций (по Мизесу) в зависимости от изменения коэффициента устойчивости запаса  $K_{уст}$  приведены на рис. 15-19.

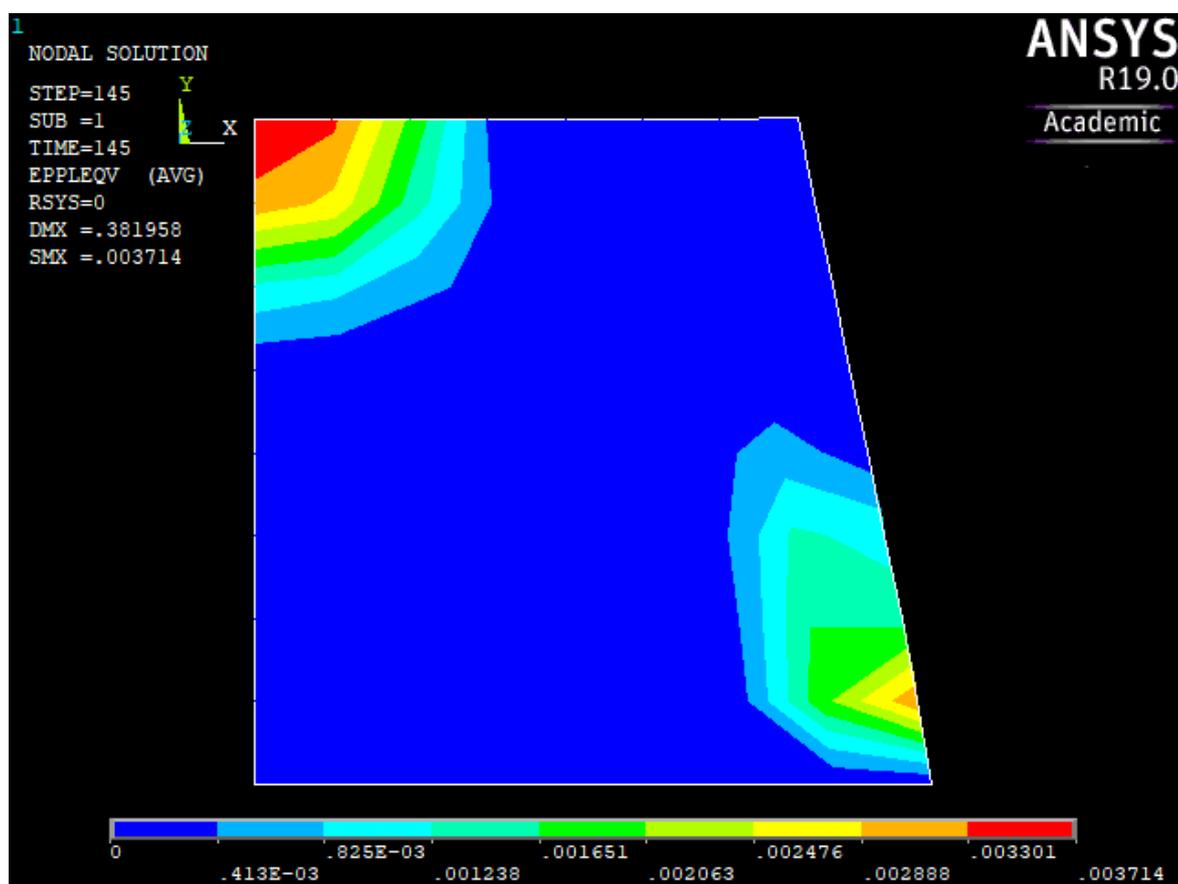


Рис. 15. Интенсивность пластических деформаций при  $K_{уст}=1$ .

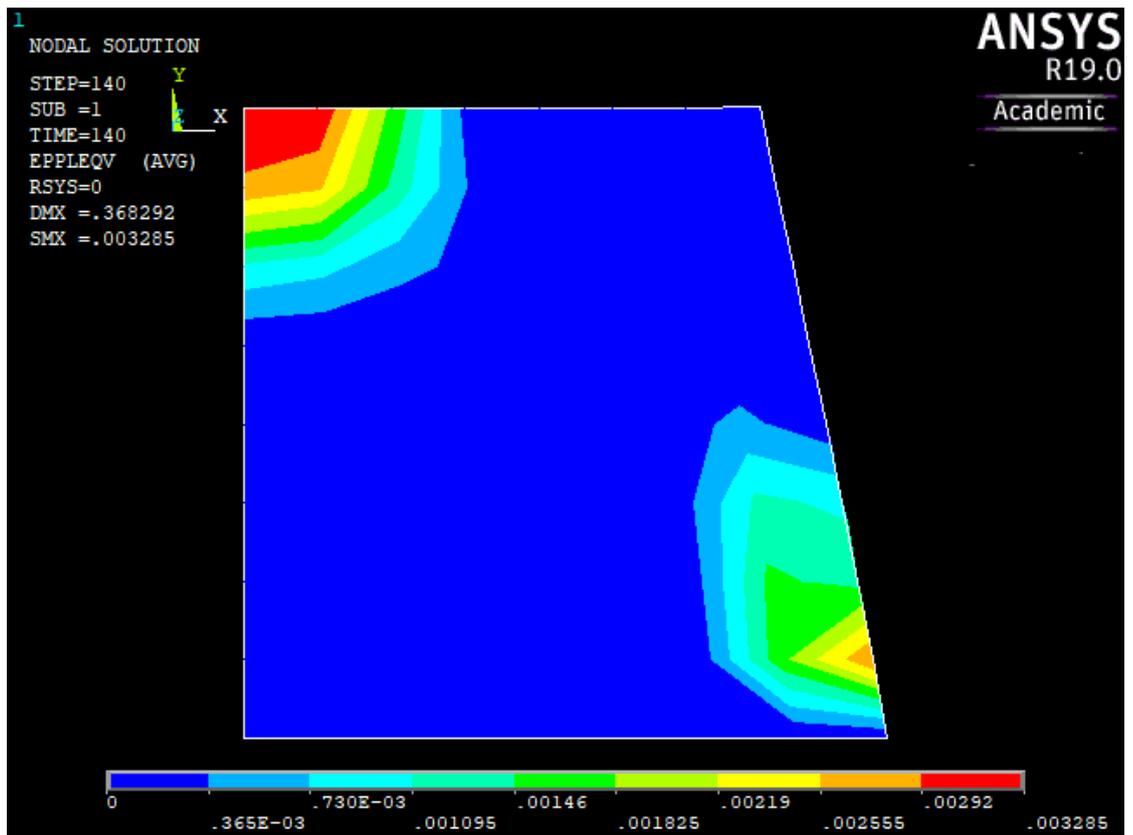


Рис. 16. Интенсивность пластических деформаций при  $K_{уст}=1,15$ .

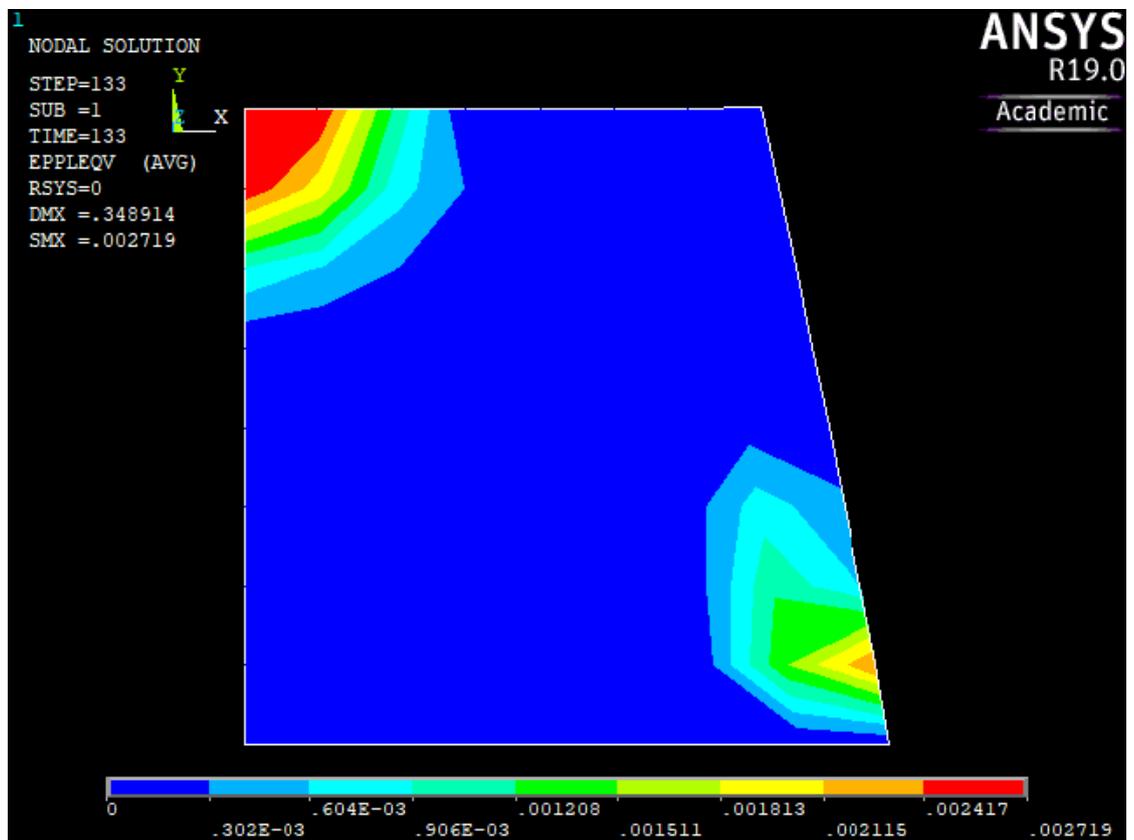


Рис. 17. Интенсивность пластических деформаций при  $K_{уст}=1,33$ .

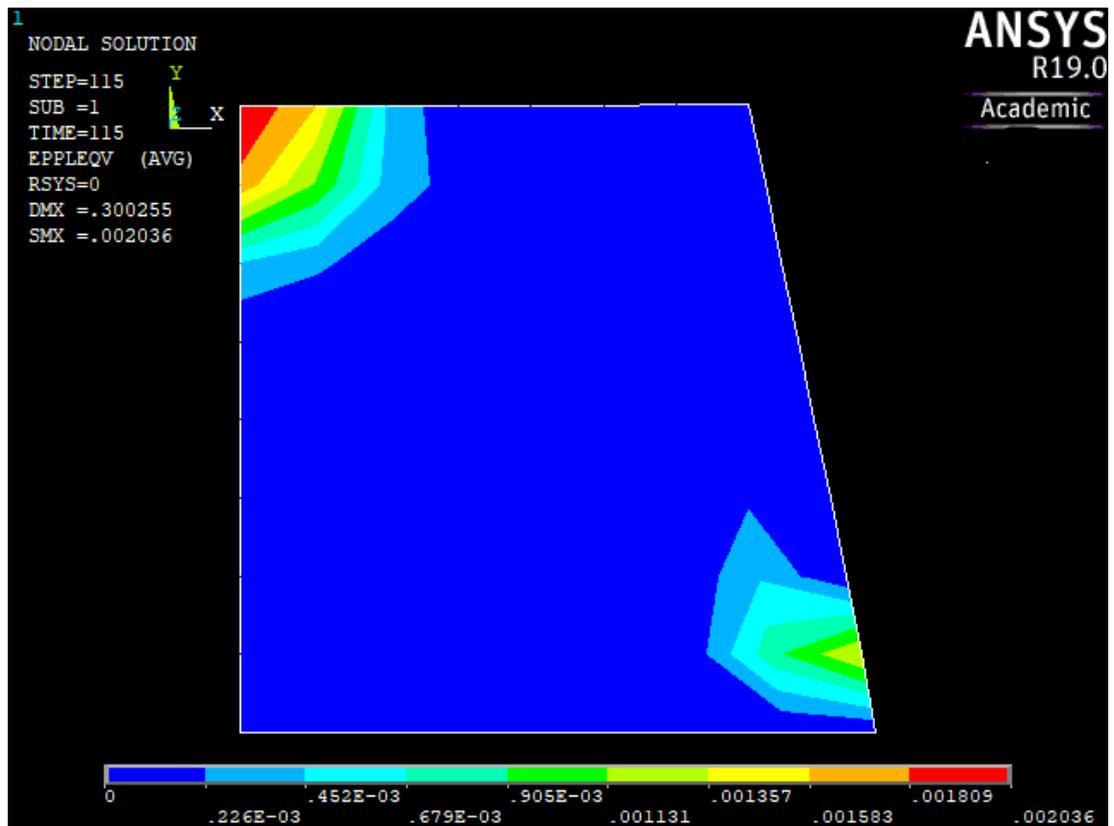


Рис. 18. Интенсивность пластических деформаций при  $K_{уст}=1,4$ .

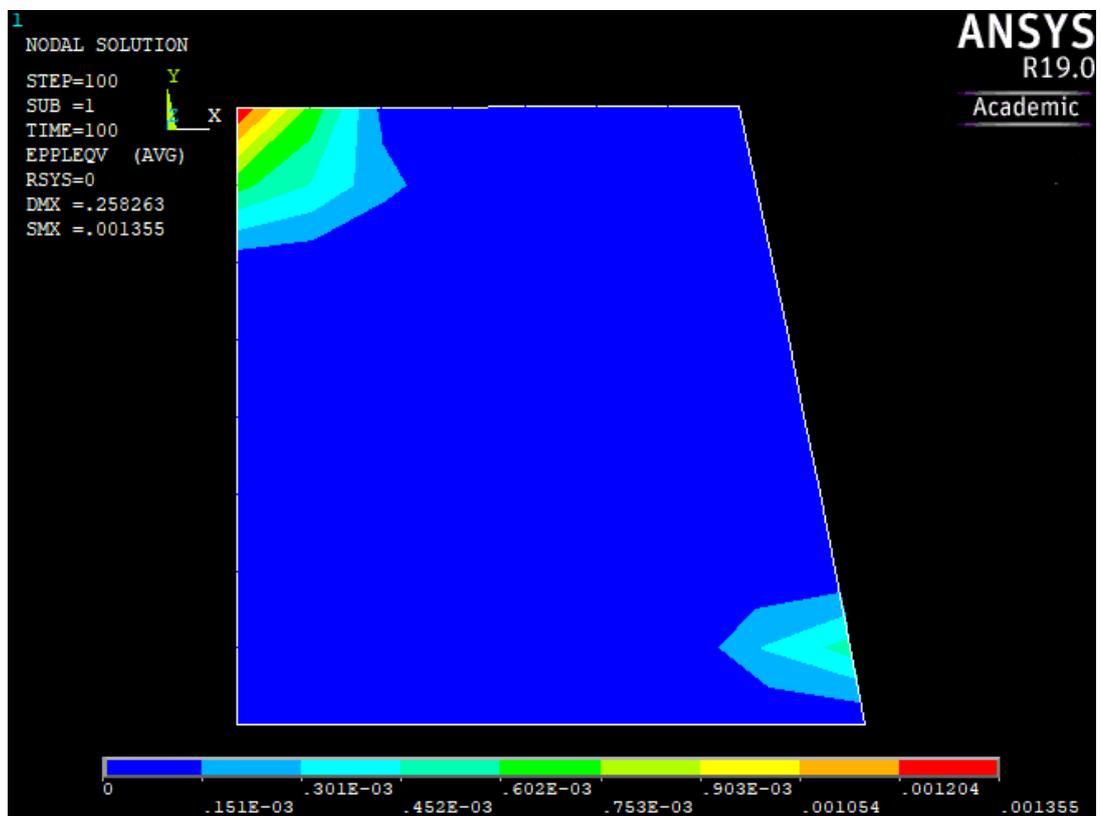


Рис. 19. Интенсивность пластических деформаций при  $K_{уст}=1,45$ .

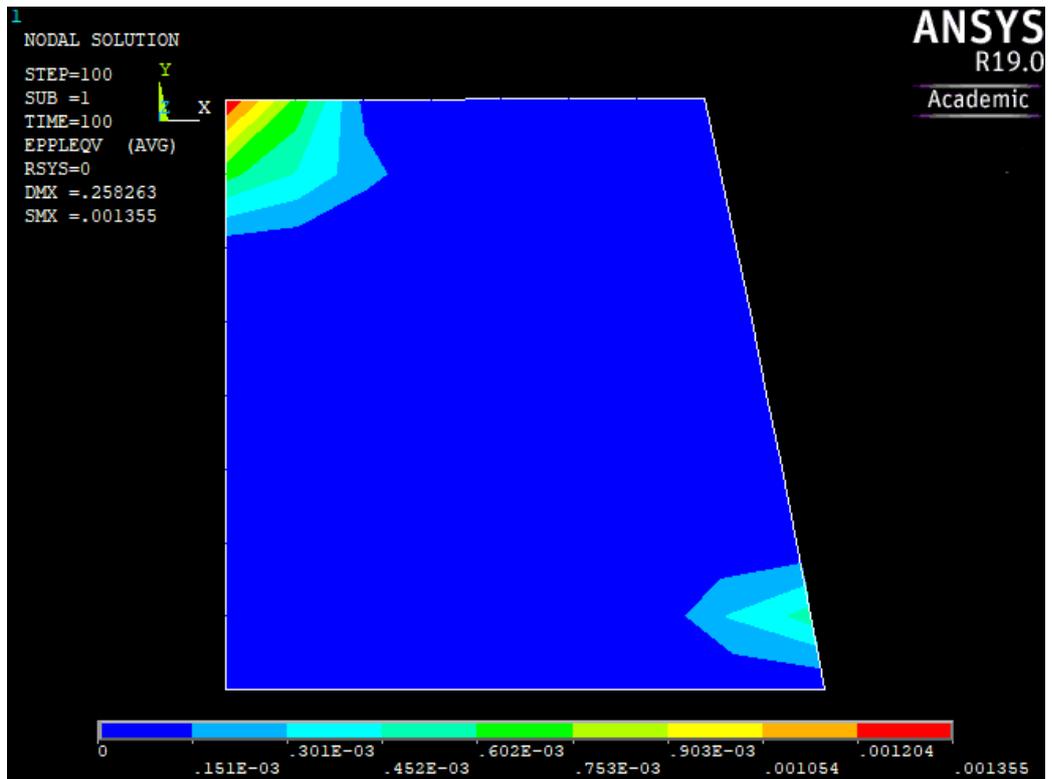


Рис. 20.  $\varphi=22^\circ$ ,  $c=22.555\text{КПа}$

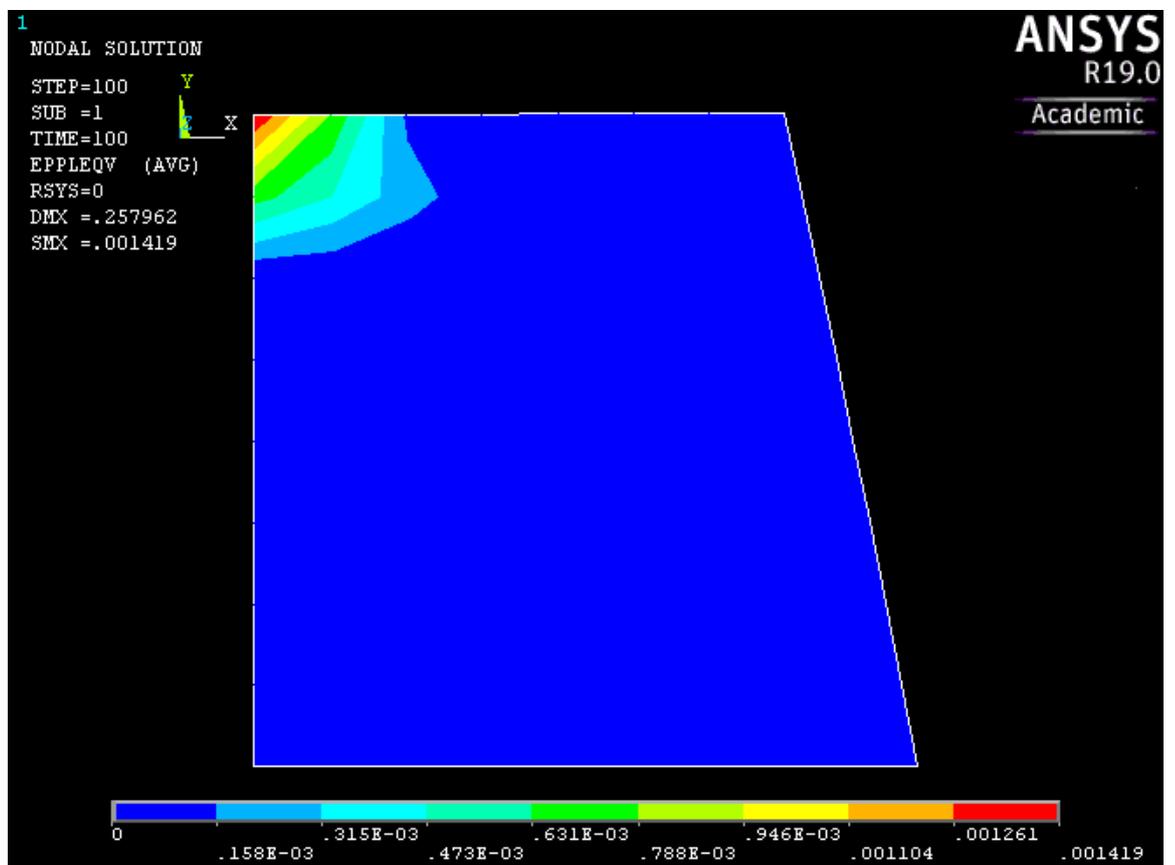


Рис. 21.  $\varphi=30^\circ$ ,  $c=22.555\text{КПа}$

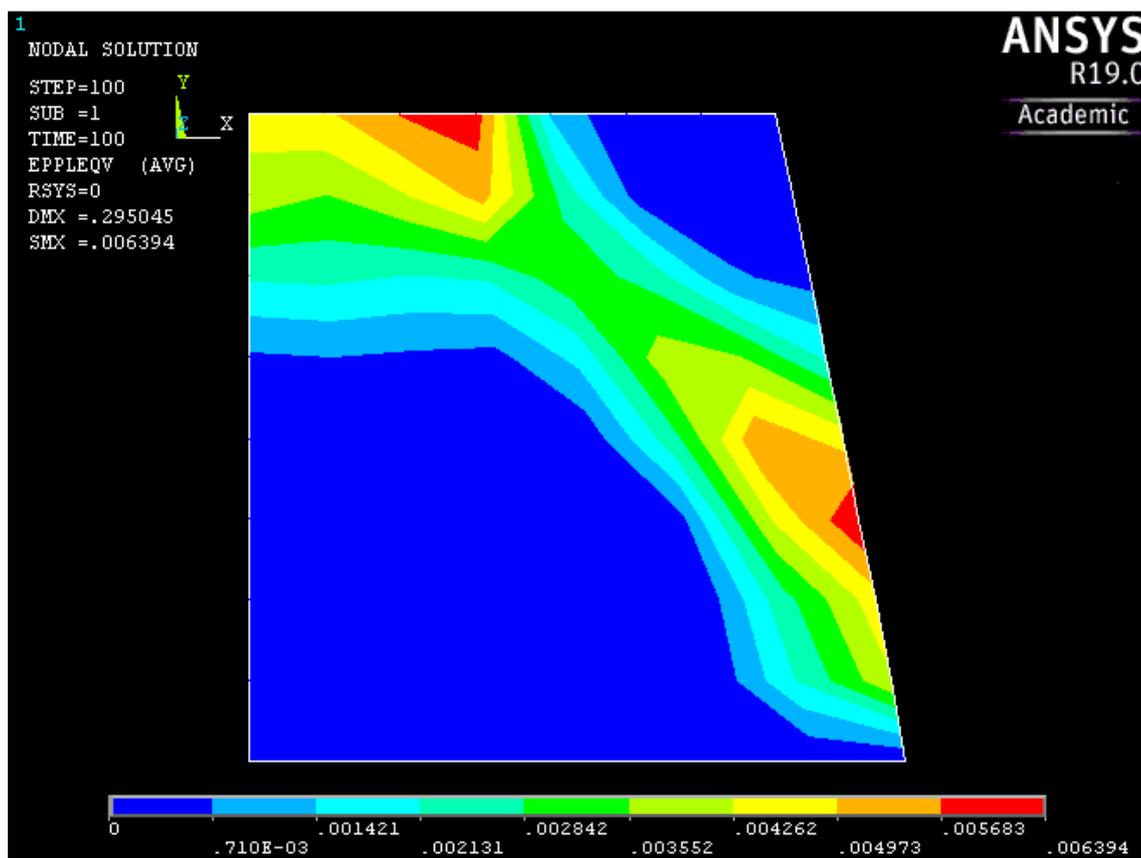


Рис.22.  $\varphi=22^\circ$ ,  $c=10$ Кпа.

Результаты проведённых расчётов указывают на уменьшение интенсивности пластических деформаций при повышении коэффициента запаса устойчивости. На основе выбранного метода зоны пластических деформаций будут видоизменяться в зависимости от варьирования коэффициента, а это значит, что повышенный коэффициент запаса устойчивости приводит к упрочнению техногенного откоса.

Кроме того, проводились расчёты в зависимости от основных факторов – удельного сцепления и угла внутреннего трения.(рис. 20-22). Анализ результатов численного моделирования показал, что при повышении удельного сцепления или внутреннего угла трения устойчивость грунта увеличивается.

## Заключение

В данной работе изучены аналитические, графические, а также численные методы расчета коэффициента запаса устойчивости, как мера прогноза устойчивости техногенных откосов.

Рассмотрены основные модели устойчивости склонов, определяющие влияние основных факторов – сцепление, угол внутреннего трения.

Изучены основные расчетные методы, позволяющие определить коэффициент запаса устойчивости – метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, метод Бишопа. Для конкретного реального объекта по предоставленным данным геофизических измерений рассчитан коэффициент запаса устойчивости. Произведено программное определение коэффициента запаса устойчивости по упрощённому методу Бишопа, а также сравнение программного коэффициента и расчётного.

Для уточнения картины пластических деформаций и определение границ возможных зон обрушения рассмотрен метод конечных элементов на базе ППММ ANSYS Mechanical APDL. Решена модельная задача определенного вида грунта -суглинок с соответствующими физико – механическими свойствами. Разработан программный код для расчета интенсивности пластических деформаций, на основании которого был проведен анализ зависимости устойчивости техногенного склона от коэффициента запаса устойчивости, исследована зависимость устойчивости склона от физико – механических свойств грунта.

## Литература

1. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б.. Инженерная геодинамика. – СПб.: Наука, 2001. – 416с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272с.
3. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: «Недра», 1977. – 479с.
4. Мащенко А.В., Пономарёв А.Б., Сычкина Е.Н. Специальные методы механики грунтов и механики скальных пород: учебное пособие. – Пермь.: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
5. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: учебное пособие для студентв вузов. – 2 – е изд., перераб. – М.: высш.школа, 1982 – 264с.
6. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. – изд.4 – е, од ред. С.Б. Ухова, 2007. – 566с.
7. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов / Пер. с англ. В.С.Забавина; Под ред. В.Г.Мельника. М.: Стройиздат, 1988. - 240 е.: ил. - Перевод изд.: Stability analysis of earth slopes / Yand H.Huang. - ISBN 5-274-00224-2.
8. СНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения». 2004г.

## Приложение

```
fini
/clear
! начальные данные программы
/uis,msgprop,3
/nerr,5
/graphics,full
/triad,ltop
/plopts,minm,off
*afun,deg
/units,si
! свойства грунта твёрдого суглинка
! модуль Юнга
e=25.e6
! коэффициент Пуассона
nu=0.35
! плотность грунта
ro=1950
! удельное сцепление
c=22.555e3
! угол внутреннего трения
fi=22
! высота откоса
h=30.0
! отношение верхнего основания откоса к нижнему
k=0.8
! число элементов сетки
n=7
! препроцессор
/prep7
! задаем тип элемента
et,1,plane42
keyopt,1,3,2
! физико - механические свойства грунта
mp,ex,1,e
mp,nuxy,1,nu
mp,dens,1,ro
! нелинейные константы
tb,dp,1
tbdata,1,c,fi,
! задание точек
k,,0.,0.,0.
k,,h,0.,0.,
```

```

k,,k*h,h,0.,
k,,0.,h,0.,
!создание области
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
A,P51X
! сетка (без создания)
mshape,2,2D
mshkey,2
! создание сетки с размерами
ESIZE,h/n,0,
42
amesh,1
! процессор решателя
/SOLU
!задание закреплений
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,4
DL,P51X, ,UX,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
DL,P51X, ,UX,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
DL,P51X, ,UY,
nropt,auto
pred,on,,on
nlgeom,on !n !on
autots,on
*do,i,0.01,1.,0.01
acel,0,i*9.81,0,
solve
save
*enddo
! постпроцессор
/post1
/EFACET,1
! вывод пластических деформаций
PLNSOL, EPPL,EQV, 0,1.0

```



## Инженерная школа

Кафедра механики и математического моделирования

### ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ

на выпускную квалификационную работу студента Абрамовой Кристины Дмитриевны

направление подготовки 15.03.03 «Прикладная механика» группа Б3409

Руководитель ВКР профессор кафедры МиММ Борисов Е.К.

На тему Исследование устойчивости техногенных склонов на основе конечно-элементного моделирования

Дата защиты ВКР «04» июля 2018 г.

Работа посвящена исследованию устойчивости техногенных склонов на основе методов кругло-цилиндрических поверхностей скольжения и конечно-элементного моделирования в пакете ANSYS. Рассмотрены различные модели устойчивости склонов, изучены методы расчета и произведено сравнение результатов.

Построено решение задачи для грунта с определенными свойствами и заданным коэффициентом устойчивости в пакете ANSYS APDL, что позволяет использовать прямые команды и дает больше возможностей пользователю при моделировании. Полученные результаты рекомендуется развить в дальнейшем с применением методов нейронного программирования.

Студентка Абрамова К.Д. показала высокий уровень владения средствами математического и компьютерного моделирования задач механики, умеет работать самостоятельно.

В целом считаю, что Абрамова К.Д. достойна присуждения степени бакалавра по направлению подготовки «Прикладная механика», заслуживает оценки «отлично» и может быть рекомендована к поступлению в магистратуру. Заимствование составляет 18 %.

Руководитель ВКР профессор  
Уч. степень и звание

«02» июля 2018 г.



Е.К. Борисов  
И.О. Фамилия