

# Основания и фундаменты, подземные сооружения

УДК 624.131:622.271

DOI: 10.14529/build220102

## РАСЧЁТ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ УСТУПОВ ГРУНТОВЫХ ВЫЕМОК ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ

*С.Л. Туманов, С.А. Калиновский, А.Р. Рисунов, Е.А. Черткочева*  
*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия*

В данной работе приводятся результаты исследований устойчивости двухслойных уступов откосов грунтовых выемок при упругопластическом распределении напряжений. Задача об определении устойчивости двухслойного уступа весьма полезна в практической инженерной деятельности. В частности, возможны ситуации, когда на поверхность откоса был насыпан грунт, который в течение длительного времени слежался, поскольку находится на откосе уже длительное время. Точность решения задачи об устойчивости уступов откоса ввиду невозможности абсолютно точно определить физико-механические характеристики грунтов, слагающих откос, представляется весьма относительной. С другой стороны, точные решения этой задачи в упруго-пластической постановке весьма трудоёмки с точки зрения применения математического аппарата. Поэтому авторы сочли необходимым выполнить сравнение результатов упругого и упругопластического решений задачи об устойчивости уступов откосов. С этой целью были определены численные значения напряжений в различных точках выбранной расчётной модели при помощи метода конечных элементов, а также на основе использования методов теории функций комплексного переменного. В результате расчётами установлено, что даже при наличии в грунтовом массиве двухслойного уступа откоса пластических областей коэффициент устойчивости, определённый при решении упругой и упругопластической задач, практически одинаков.

*Ключевые слова:* упругая и упругопластическая задачи; вертикальные, горизонтальные и касательные составляющие напряжений; двухслойный уступ, параметр устойчивости; поверхность разрушения; удерживающие и сдвигающие силы; модуль упругости; коэффициент бокового давления; коэффициент устойчивости.

### Введение

Решение проблемы обеспечения долговременной устойчивости уступов откосов и бортов карьеров имеет особую актуальность в горном деле и в строительстве, так как от их параметров зависит безопасность разработки месторождений полезных ископаемых [1] и строительства различных зданий и сооружений в приоткосных зонах.

В работах [2–4] приводятся результаты исследований и расчётов устойчивости однородных и двухслойных уступов откосов грунтовых выемок с использованием задач теории упругости. Однако в реальных условиях при коэффициентах устойчивости, близких к единице (т. е. в наиболее интересных для практики случаях), в приоткосной зоне имеются как упругие, так и пластические области.

Точное решение упругопластической задачи представляет значительные математические трудности, не оправданные точностью полученных результатов. Используемые в расчётах значения физико-механических характеристик грунтов определяются довольно приблизительно. Параметры грун-

тов практически всегда являются величинами неточными из-за случайных ошибок, которые связаны с естественной природой самого объекта и ошибками (погрешностями), возникающими при отборе образцов грунта для проведения опытов. Кроме того, неточности могут быть обусловлены неопределённостями, связанными с технологией определения параметров (погрешности аналитических устройств и неточная их калибровка) [4]. Поэтому целесообразно упругопластическую задачу решать приближенно. К тому же в практике проектирования укоренилось не критичное отношение к выбору расчётных моделей и реализующих их программ [5, 6]. Возможность использования приближенного аналитического решения смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунта для предварительной оценки несущей способности пластов грунта была также подтверждена в работе [7].

В работе [8] исследуется устойчивость однородных уступов откосов при упруго-пластическом распределении напряжений в приоткосной зоне. При этом сделаны два допущения: 1) наиболее

вероятная поверхность скольжения, построенная по методике [9], с появлением пластической области не изменяет своё положение значительно; 2) вертикальные составляющие напряжений с переходом массива откоса в предельное состояние также практически не изменяются и определяются упругим решением. Эти допущения обоснованы результатами экспериментальных исследований на моделях из эквивалентных материалов. Получены формулы для определения напряжений в пластической и упругой областях, разработана методика определения границы между этими областями.

В частности, получены выражения для вычисления горизонтальных и касательных безразмерных напряжений (в долях  $\gamma H$ , где  $\gamma$  – объёмный вес грунта,  $H$  – высота откоса) в пластической области:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_x(1-m) - \lambda m}{1+m}; \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{0,5m(2\sigma_x + \lambda) \operatorname{tg} 2\alpha}{1+m},$$

где  $\sigma_x$  – вертикальная составляющая безразмерных напряжений;  $m = \sin \beta \cos 2(\alpha - (45^\circ + 0,5\varphi))$ ;  $\alpha$  – угол наклона уступа;  $\beta$  – угол заложения откоса;  $\lambda$  – параметр устойчивости, зависящий от физико-механических характеристик грунта;

$$\lambda = \frac{2C}{\gamma H \operatorname{tg} \varphi}, \quad (2)$$

где  $C$  – удельное сцепление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

#### Методика проведения исследований

При решении упругопластических задач для слоистых откосов возможны три случая: 1) наиболее вероятная поверхность разрушения пересекает слои; 2) полностью совпадает с контактной зоной слоёв; 3) частично совпадает с контактными зонами слоёв.

В первом случае решение упругопластической задачи реализуется подобно реше-

нию, выполненному для однородных откосов. Разница состоит в том, что при построении наиболее вероятных поверхностей скольжения напряжения определяются решением задач теории упругости для слоистых откосов, и, так как слои имеют разные физико-механические характеристики, параметр устойчивости является функцией координат точек приоткосной зоны. Очевидно, что в таком случае (аналогично как и для однородных откосов) величина коэффициента устойчивости, вычисленная из решения упругой и упругопластической задачи, практически одинакова.

Если поверхность разрушения полностью проходит по контакту слоёв, то в каждой её точке известно положение площадки разрушения. Поэтому при решении задачи в этом случае остаётся одно допущение, состоящее в том, что с появлением в приоткосной зоне пластической области вертикальная составляющая напряжений почти не изменяется и определяется решением соответствующих задач теории упругости для слоистых откосов.

При частичном совпадении поверхности разрушения с контактом слоёв решение упругопластической задачи представляет, очевидно, комбинацию решений, рассмотренных в первых двух случаях.

Решение последней задачи дало результаты, качественно совпадающие с аналогичными результатами, полученными для однородных откосов.

Установлено, что значительное влияние на устойчивость откосов оказывает величина коэффициента бокового давления грунта (как для одноступенчатых [10–12], так и многоступенчатых [9]).

На рис. 1 представлена расчётная схема грунтовой выемки с углом откоса  $\beta = 35^\circ$  и уступами, каждый из которых имеет угол заложения  $\alpha = 60^\circ$ .

Принято полагать [13, 14], что накладываемые на расчётную конечно-элементную схему граничные условия практически не влияют на распределение напряжений при удалённости границ расчётной области от её исследуемой части не менее чем на 6 максимальных размеров этой области.

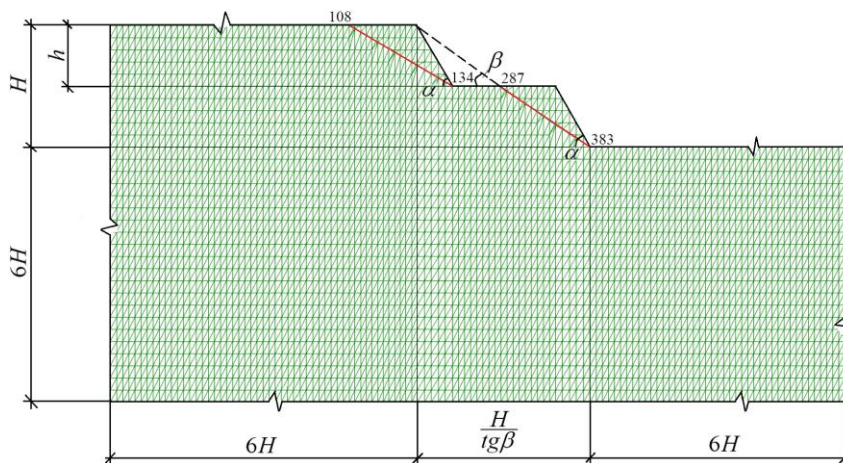


Рис. 1. Схема к расчёту устойчивости уступов двухступенчатого борта при  $\beta = 35^\circ$ ;  $\alpha = 60^\circ$

## Основания и фундаменты, подземные сооружения

Таким образом, горизонтальный размер модели принят равным  $\left(12 + \frac{1}{\operatorname{tg}\beta}\right)H$ , а вертикальный –  $7H$

( $H$  – высота откоса). Грунтовый массив, вмещающий откос с уступами, сложен слоями пород, «падающими» в сторону выемки. Принято, что наиболее вероятная поверхность разрушения полностью совпадает с контактом слоёв, а угол наклона контактной поверхности в каждом рассматриваемом случае равен углу наклона откоса.

На представленной схеме контакт слоёв проходит через точки 108–134 и 287–383, то есть поперечное сечение верхнего слоя – треугольник, нижнее – вся остальная область.

Пусть  $E_1$  и  $\zeta_{01}$  – соответственно модуль упругости и коэффициент бокового давления грунта верхнего слоя, а  $E_2$  и  $\zeta_{02}$  – нижнего. Примем следующие значения указанных характеристик:  $E_1 : E_2 = 0,1$ ;  $\zeta_{01} = 0,75$ ;  $\zeta_{02} = 0,3$  [15, 16].

Для анализа напряжённо-деформированного состояния приоткосной зоны с учётом областей пластических деформаций в рассматриваемом грунтовом массиве и определения коэффициента устойчивости двухслойного уступа применён метод конечных элементов (МКЭ), формализованный в компьютерной программе [17]. Вопрос сходимости решён посредством сравнения результатов, полученных посредством МКЭ для расчётной схемы однородного грунтового массива, с соответствующими результатами, полученными по методике, основанной на точном решении задач теории упругости для весомой изотропной полуплоскости с трапециевидными вырезами по её границе [2, 18], аналогично тому, как это сделано в работах [3, 8]. Кроме того, проверка адекватности выбора размеров расчётной модели проводилась при помощи сопоставления численных значений напряжений в различных ее точках, вычисленных при помощи метода конечных элементов [19], с численными значениями

соответствующих напряжений, вычисленных на основе использования методов теории функций комплексного переменного [18, 20].

### Анализ результатов

На рис. 2 приведены эпюры распределения безразмерных напряжений вдоль контакта слоёв, полученные из решения задач теории упругости (сплошные линии). Величина коэффициента устойчивости для принятых характеристик грунтов:

$$\frac{K}{\operatorname{tg}\beta} = 5,53\lambda + 1,1. \quad (3)$$

Значение угла внутреннего трения принимаем  $\varphi = 13^\circ$ . Полагая в формуле (3)  $K = 1$ , можно определить значение параметра устойчивости  $\lambda = 0,587$ , при котором откос находится в предельном состоянии.

На рис. 3 указаны эпюры удерживающих и сдвигающих сил, построенные по напряжениям, определённым из упругого решения при  $\varphi = 13^\circ$  и  $\lambda = 0,587$  (кривые CD и BE), действующих вдоль контакта слоёв. Наименьшее значение коэффициента устойчивости соответствует точке 360. Приравнивая в этой точке удерживающие и сдвигающие силы при  $\varphi = 13^\circ$ , получим  $\lambda = 1,31$ . Определённые два значения параметра  $\lambda$  позволяют вычислить по формуле (2) высоту борта карьера  $H_{\text{пр}}$ , при которой нижний уступ ( $h_{\text{пр}} = 0,5H_{\text{пр}}$ ) находится в предельном состоянии ( $h_{\text{пр}} = 8,76C\gamma^{-1}$ ;  $K = 1$ ) и  $h_{\text{уп}} = 3,93C\gamma^{-1}$ , при которой в приоткосной зоне нет областей пластических деформаций (при  $\lambda = 1,31$ ;  $K = 1,9$ ). Таким образом, при высоте нижнего уступа  $h \leq h_{\text{пр}}$  ( $K \geq 1,9$ ) в приоткосной зоне не может возникнуть областей пластических деформаций, а значит, справедливо упругое решение [2]. При  $h_{\text{уп}} < h \leq h_{\text{пр}}$  ( $1 \geq K > 1,9$ ) в приоткосной зоне имеется область пластических деформаций и следует при определении устойчивости использовать решение упругопластической задачи [8].

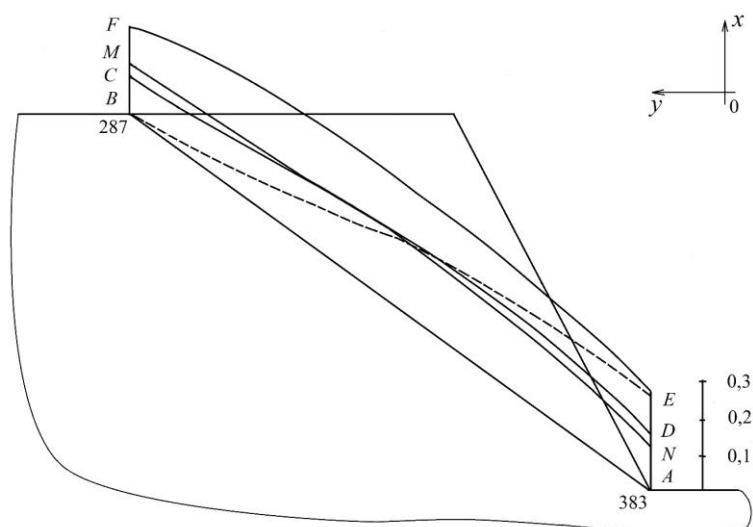


Рис. 2. Эпюры удерживающих и сдвигающих сил

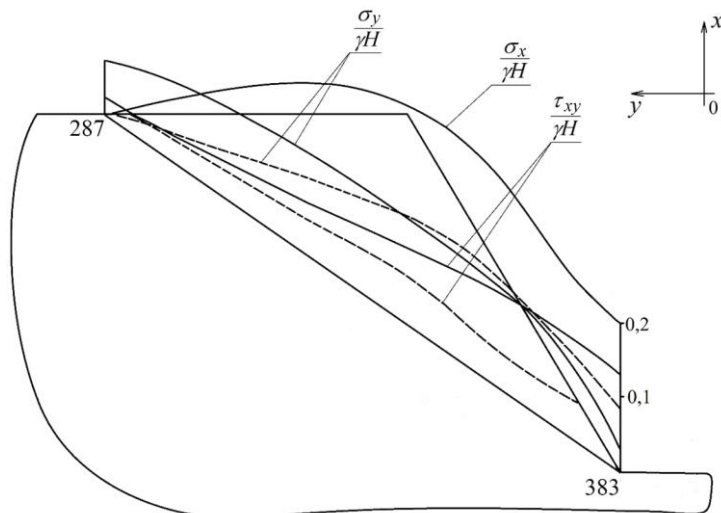


Рис. 3. Эпюры безразмерных напряжений

Рассмотрим предельное состояние уступа ( $\varphi = 13^\circ$ ,  $\lambda = 0,587$ ). Напряжения в точках поверхности разрушения определяются посредством формул (1).

Сравнение величин напряжений показывает, что с появлением пластической области и переходом откоса в предельное состояние горизонтальные и касательные составляющие напряжений значительно перераспределяются. Касательные составляющие напряжений убывают практически вдоль всего контакта, горизонтальные составляющие в приоткосной области выше, чем полученные из упругого решения, но по мере удаления от этой зоны в массиве они становятся близки к ним. С приближением к дневной поверхности горизонтальные составляющие резко уменьшаются.

При использовании значений полученных напряжений построены эпюры безразмерных удерживающих и сдвигающих сил, указанные на рис. 3, из которого заметно, что удерживающие силы, определённые решением смешанной задачи (кривая  $MN$ ), практически совпадают с удерживающими силами, определёнными упругим решением (кривая  $CD$ ). Картина распределения сдвигающих сил при различных решениях выглядит по-разному, однако сумма этих сил, действующих вдоль всей поверхности разрушения, одинакова (отличие величин составляет 4 %). Значит, упругое и упругопластическое решение при переходе грунтового массива в предельное состояние дают одинаковые значения сумм удерживающих и сдвигающих сил, а следовательно, и величин коэффициентов устойчивости откоса.

Исследования, проведённые для слоистых откосов с другими физико-механическими характеристиками грунта, дали аналогичные результаты.

#### Выводы

Таким образом, в заключение можно отметить, что с появлением в приоткосных зонах уступов областей пластических деформаций происходит перераспределение горизонтальных и касательных составляющих напряжений, а также действующих вдоль поверхности разрушения сдвигающих сил. Вертикальные составляющие напряжений и удерживающие силы, практически не изменяясь, определяются упругим решением [2, 3]. При этом сдвигающие силы перераспределяются так, что в сумме остаются примерно такими же, как и полученные при помощи упругого решения, поэтому величины  $K$ , определяемые как отношение суммы удерживающих к сумме сдвигающих сил, при использовании решений упругопластической и упругой задач практически одинаковы.

#### Литература

1. Яковлев, А.В. Геомеханическое обеспечение формирования бортов карьеров и отвалов / А.В. Яковлев // Проблемы недропользования. – № 4. – 2016. – С. 75–80. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.075
2. Цветков, В.К. Расчёт устойчивости двухслойных уступов бортов карьеров / В.К. Цветков, С.Л. Туманов // Известия вузов. Горный журнал. – 1996. – № 7. – С. 25–29.
3. Туманов, С.Л. Расчёт устойчивости двухслойных уступов в зависимости от угла наклона борта карьера и их местоположение на его откосе / С.Л. Туманов // Градостроительство: тез. докл. по итогам науч.-техн. конф. ВолгГАСА / ВолгГАСА. – Волгоград, 1996. – С. 38.
4. Tsvetkov, V.K. Stability of multilevel terrace of inhomogeneous rock / V.K. Tsvetkov, A.N. Bogomolov // Journal of Mining Science. – 1996. – Vol. 32, Iss. 3. – P. 192–196. DOI: 10.1007/BF02046588.
5. Строкова, Л.А. Калибровка параметров упругости упругопластической модели путем моделирования лабораторных испытаний / Л.А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 1. – С. 87–92.
6. Маскалева, В.В. Особенности работы слабых глинистых грунтов / В.В. Маскалева, В.Р. Мухоморова // Проблемы недропользования. – № 4. – 2016. – С. 81–86. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.081

мадиев // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2014. – № 6 (21). – С. 104–119.

7. Туманов, С.Л. Расчёт устойчивости грунтового массива при упругопластическом распределении напряжений / С.Л. Туманов, С.С. Туманова // *Международ. науч.-практ. конф., посвященная 55-летию кафедры строительного производства и геотехники ПНИПУ и 60-летию кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ: матер. конф., 10–13 фев. 2015 г. Волгоград. – Волгоград, ВолгГАСУ, 2015. – С. 140–142.*

8. Bogomolov, A.N. Comparison of physical and computational experiment results to determine the load-bearing capability of a uniform plate bed / A.N. Bogomolov, O.A. Bogomolova // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2016. – Vol. 52, iss. 6. – P. 322–328. DOI: 10.1007/s11204-016-9348-x.

9. Исследование напряженного состояния приоткосной зоны грунтовой выработки в зависимости от коэффициента бокового давления / С.Л. Туманов, С.А. Калиновский, Ю.М. Фетисов, А.Р. Рисунцов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура*. – 2018. – № 51 (70). – С. 26–33.

10. Влияние коэффициента бокового давления грунта на степень устойчивости однородного откоса / О.А. Богомолова, Б.С. Бабаханов, С.Ю. Калашиников и др. // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура*. – 2013. – Вып. 30 (49). – С. 39–49.

11. Bogomolov, A.N. Assessment of slope stability on the basis of soil mass stress state analysis / A.N. Bogomolov, A.V. Ponomaryov, O.A. Bogomolova // *ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017. – P. 2095–2098.

12. Bogomolov, A.N. Calculation of slopes stability based on the energy approach / A.N. Bogomolov, A.N. Ushakov, O.A. Bogomolova // *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013. – 2013. – Part 3. – P. 2145–2148.*

13. Bogomolov, A.N. Numerical and physical modeling of the stability of the workings developing the slope / A.N. Bogomolov, G.A. Abramov, O.A. Vo-

gomolova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 365(4), 042077.

14. Bogomolov A.N., Ponomaryov A.V., Bogomolova O.A. Determination of soil pressure on anti-landslide retaining structures based on the stress state analysis of a near-slope area. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development – Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015, 2015, 4, с. 1849–1854;*

15. Анализ методов определения коэффициентов бокового давления грунта (аналитические методы) / А.Н. Богомолов, С.А. Калиновский, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков // *Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства: материалы III Международ. науч.-техн. конф., 10–12 апр. 2012 г., Волгоград / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2012. – С. 58–85.*

16. Анализ методов определения коэффициентов бокового давления грунта (экспериментальные методы) / А.Н. Богомолов, С.А. Калиновский, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков // *Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства: материалы III Международ. науч.-техн. конф., 10–12 апр. 2012 г., Волгоград / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2012. – С. 33–57.*

17. Богомолов, А.Н. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) / А.Н. Богомолов и др. // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.*

18. Bogomolov, A.N. Stress-strain state of an elastic half plane under a system of inclined piecewise-linear loads / A.N. Bogomolov, A.N. Ushakov // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013, Vol. 50, Iss. 2, pp. 43–49.

19. Метод расчета устойчивости нагруженных откосов и его экспериментальное обоснование / О.А. Богомолова, А.В. Ечевский, Б.С. Бабаханов и др. // *Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2012. – Вып. 26 (45). – С. 32–41.*

20. Богомолов, А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке / А.Н. Богомолов. – Пермь: ПГТУ, 1996. – 150 с.

**Туманов Сергей Леонидович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения», Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), tumserlen@yandex.ru.

**Калиновский Сергей Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения», доцент кафедры «Строительная механика», Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), sk0522@yandex.com.

**Рисунцов Андрей Романович**, аспирант кафедры «Технологии строительного производства», Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), andreyrisunov@mail.ru.

**Черткоева Елена Анатольевна**, студент группы СМ-3-20, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), 999-deva@mail.ru.

*Поступила в редакцию 18 октября 2021 г.*

## CALCULATION OF THE STABILITY OF TWO-LAYER LEDGES OF EXCAVATIONS WITH ELASTIC-PLASTIC STRESS DISTRIBUTION

S.L. Tumanov, tumserlen@yandex.ru.

S.A. Kalinovskiy, sk0522@yandex.com

A.R. Risunov, andreyrisunov@mail.ru

E.A. Chertkoeva, 999-deva@mail.ru

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

In this paper, the results of research work on the stability of two-layer ledges of the slopes of excavations with elastic-plastic stress distribution are presented. The problem of determining the stability of the two-layer ledge is extremely useful in practical engineering activities. In particular, the situations when soil poured onto the surface of the slope has compacted since it has been laying on the slope for a long time may appear. The accuracy of solving the problem of the stability of the slope ledges in view of the impossibility of absolutely accurately determining the physical and mechanical characteristics of the soils making up the slope seems to be rather relative. On the other hand, the exact solutions of this problem in the elastic-plastic formulation are extremely cumbersome from the point of view of applying mathematical apparatus. Therefore, the authors have considered it necessary to compare the results of elastic and elastic-plastic solutions of the problem of the stability of slope ledges. For this purpose, the numerical values of stresses at various points of the selected design model have been determined, using the finite element method, as well as using the methods of the theory of functions of a complex variable. As a result, it has been calculated that even if there is a two-layer ledge of a slope of plastic regions in the soil massif, the stability coefficient determined when solving elastic and elastic-plastic problems is practically the same.

*Keywords:* elastic and elastic-plastic problems; vertical, horizontal and tangential stress components; two-layer ledge, stability parameter; fracture surface; retaining and shearing forces; modulus of elasticity; lateral pressure coefficient; stability coefficient.

### References

1. Yakovlev A.V. [Geomechanical Support for the Formation of Sides of Quarries and Dumps]. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of Subsurface Use], 2016, no. 4, pp. 75–80. (in Russ.). doi: 10.18454/2313-1586.2016.04.075
2. Tsvetkov V.K., Tumanov S.L. [Calculation of Stability of Two-Layer Ledges of Quarry Sides]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Universities. Mining Magazine], 1996, no. 7, pp. 25–29. (in Russ.)
3. Tumanov S.L. [Calculation of the Stability of Two-Layer Ledges Depending on the Angle of Inclination of the Side of the Quarry and Their Location on its Slope]. *Gradostroitel'stvo: tez. dokl. po itogam nauch.-tekhn. konf. VolgGASA* [Urban Planning: Abstracts of Reports on the Results of the Scientific and Technical Conference of VSACA], Volgograd, 1996, pp. 38. (in Russ.)
4. Tsvetkov V.K., Bogomolov A.N. [Stability of Multilevel Terrace of Inhomogeneous Rock]. *Journal of Mining Science*, 1996, vol. 32, iss. 3, pp. 192–196. (in Russ.). doi:10.1007/BF02046588;
5. Stroková L.A. [Calibration of Elasticity Parameters of the Elastic-Plastic Model by Modeling Laboratory Tests]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2009, vol. 315, no. 1, pp. 87–92. (in Russ.)
6. Maskaleva V.V., Mukhamadiyev V.R. [Features of the Weak Clay Soils]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures], 2014, no. 6 (21), pp. 104–119. (in Russ.)
7. Tumanov S.L., Tumanova S.S. [Calculation of the Stability of the Soil Mass for Elastic-Plastic Distribution Stress]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 55-letiyu kafedry stroitel'nogo proizvodstva i geotekhniki PNIPU i 60-letiyu kafedry gidrotekhnicheskikh i zemlyanykh sooruzheniy VolgGASU* [International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 55th Anniversary of the Department of Construction Production and Geotechnics Of PNRPU and the 60th Anniversary of the Department of Hydraulic Engineering and Earthworks of VolgGASU]. Volgograd, 2015, pp. 140–142. (in Russ.)
8. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. [Comparison of Physical and Computational Experiment Results to Determine the Load-Bearing Capability of a Uniform Plate Bed], 2016, vol. 52, iss. 6, pp. 322–328. doi:–10.1007/s11204-016-9348-x;
9. Tumanov S.L., Kalinovskiy S.A., Fetisov Yu.M., Risunov A.R. [Study of the Stress State of Near-Slope Zone of Soil Development Depending on the Coefficient of Lateral Pressure]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2018, no. 51 (70), pp. 26–33. (in Russ.)

10. Bogomolova O.A., Babakhanov B.S., Kalashnikov S.Yu., Kalinovskiy S.A., Prokopenko A.V., Ivanov A.A. [The Influence of the Lateral Pressure Coefficient of the Soil on the Degree of Stability of a Homogeneous Slope]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Construction. Ser. Construction and Architecture], 2013, iss. 30 (49), pp. 39–49. (in Russ.)
11. Bogomolov A.N., Ponomaryov, A.B., Bogomolova O.A. [Assessment of Slope Stability on the Basis of Soil Mass Stress State Analysis]. *ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, pp. 2095–2098.
12. Bogomolov A.N., Ushakov A.N., Bogomolova O.A. [Calculation of Slopes Stability Based on the Energy Approach]. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics ICSMGE 2013*, 2013, part 3, pp. 2145–2148;
13. Bogomolov A.N., Abramov G.A., Bogomolova O.A. [Numerical and Physical Modeling of the Stability of the Workings Developing the Slope]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 365(4), 042077.
14. Bogomolov A.N., Ponomaryov A.B., Bogomolova O.A. [Determination of Soil Pressure on Anti-Landslide Retaining Structures Based on the Stress State Analysis of a Near-Slope Area]. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development - Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015*, 2015, vol. 4, pp. 1849–1854.
15. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. [Analysis of Methods for Determining the Lateral Soil Pressure Coefficient (Experimental Methods)]. *Inzhenernyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsiya* [Engineering Problems of Construction Materials Science, Geotechnical and Road Construction: Materials of the III International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VolgGASU Publ., 2012, pp. 58–85. (in Russ.)
16. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. [Analysis of Methods for Determining the Lateral Soil Pressure Coefficient (Analytical Methods)]. *Inzhenernyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsiya* [Engineering Problems of Construction Materials Science, Geotechnical and Road Construction: Materials of the III International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VolgGASU Publ., 2012, pp. 33–57. (in Russ.)
17. Bogomolov A.N. *Ustoychivost' (napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye)* [Sustainability (Stress-Strain State)]. Certificate on the State Registration of the Computer Program Russian Federation, no. 2009613499, Application 30.06.2009.
18. Bogomolov A.N., Ushakov A.N. [Stress-Strain State of an Elastic Half Plane under a System of Inclined Piecewise-Linear Loads]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2013, vol. 50, iss. 2, pp. 43–49.
19. Bogomolova O.A., Echevskiy A.V., Babakhanov B.S., Solov'yev A.V., Makhova S.I., Kalinovskiy S.A. [The Method of Calculating the Stability of Loaded Slopes and his Experimental Justification]. *Vesti. Volgogr. gos. arkhitekturno-stroitel'nogo un-ta. Ser.: Str-vo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture]. Volgograd, VolgGASU Publ., 2012, iss. 26(45), pp. 32–41. (in Russ.)
20. Bogomolov A.N. *Raschet nesushchey sposobnosti osnovaniy sooruzheniy i ustoychivosti gruntovykh massivov v uprugoplasticheskoy postanovke* [Calculation of the Bearing Capacity of the Foundations of Structures and the Stability of Soil Massifs in an Elastic-Plastic Formulation]. Perm', PGU Publ., 1996. 150 p.

*Received 18 October 2021*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Расчёт устойчивости двухслойных уступов грунтовых выемок при упругопластическом распределении напряжений / С.Л. Туманов, С.А. Калиновский, А.Р. Рисун, Е.А. Чертокоева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 16–22. DOI: 10.14529/build220102

### FOR CITATION

Tumanov S.L., Kalinovskiy S.A., Risunov A.R., Chertkoeva E.A. Calculation of the Stability of Two-Layer Ledges of Excavations with Elastic-Plastic Stress Distribution. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022, vol. 22, no. 1, pp. 16–22. (in Russ.). DOI: 10.14529/build220102