

**С.К. Ахмедиев¹, М.Ж. Бакиров¹, Г.Д. Таженова¹,
В.Ф. Михайлов^{1*}, И.С. Куанов¹**

¹Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

Информация об авторах:

Ахмедиев Серик Кабултаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-4393-3559>, email: s_ahmediev@mail.ru

Бакиров Мадид Жетписбаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-2308-0678>, email: madybacirov@rambler.ru

Таженова Гульзада Даулетхановна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0001-5512-2724>, email: gulzada_2604@mail.ru

Михайлов Валентин Феликсович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-2588-9438>, email: v.mihaylov@kstu.kz

Куанов Иса Серикович – ассистент кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-9827-5728>, email: isa_kuan@mail.ru

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ БОРТОВ, ТРАНШЕЙ И РВОВ

Аннотация. В работе рассмотрен один из методов исследования общей устойчивости грунтовых бортов, траншей и рвов. Приведено аналитическое выражение для вычисления коэффициента запаса устойчивости массива грунта, учитывающий, кроме собственного веса, также и «пригрузку» от смежных сооружений (зданий), угла внутреннего трения и силы сцепления многослойного массива грунта в «бортах». Применяется метод круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Ключевые слова: устойчивость грунтовых бортов, коэффициент запаса устойчивости, сила сцепления в грунтах, массив грунта, поверхность скольжения.

Введение

Рассматриваемой научно-технической проблеме посвящено множество работ ученых. Так, в работе [1] представлен основанный на силовом воздействии анализ предельного равновесия для устойчивости объема скользящего грунта (дисперсного массива) с двумя клинообразными его частями. Приведенный здесь анализ проводится с использованием теории механики разрушения, учитывающий изменчивость геометрии клиньев, прочности на сдвиг и так далее. Трехмерный вариант скользящей массы грунта с вертикальными границами раздела между тремя клиньями рассматривается в статье [2]. Для анализа используется пять плоскостей разрушения. Для определения коэффициента безопасности используется аналитический метод с использованием полиномиального уравнения. Метод горизонтального среза для анализа устойчивости шламовых траншей представлен в [3]. Коэффициент безопасности определяется

Для обеспечения общей устойчивости бортов траншей и рвов должен быть обеспечен достаточный коэффициент запаса устойчивости, вычисляемый по формуле [10, 11]:

$$K = \frac{\sum [(P_i \cos \alpha_i + P_{\text{coop}} \cdot \cos \alpha_{\text{coop}}) \operatorname{tg} \varphi_i + C_i l_i]}{\sum (P_i \sin \alpha_i \cdot R_i + P_{\text{coop}} d)} \quad (1)$$

где P_{coop} – вес сооружения, создающий нагрузку на поверхность земли вблизи угла откоса (вблизи точки B); R_i – радиус вектора расчетного сечения; φ_i – угол внутреннего трения i -го слоя грунта; P_i – вес i -го расчетного блока грунта; C_i – сцепление i -го слоя грунта; l_i, d – плечи для определения моментной нагрузки.

В данном исследовании расчет устойчивости массива грунта предлагается производить методом круглоцилиндрической поверхности скольжения [9–11].

В этом случае для произвольного центра вращения O_i через соответствующий радиус-вектор R_i учитывается расчетный объем массива грунта, образующий соответствующую круглоцилиндрическую поверхность скольжения.

Заданный расчетный объем вертикальными сечениями с шагом $\lambda_i = l_i / n$ делится на соответствующие расчетные блоки массива грунта 1, 2, 3, 4 (рис.1). Дальнейшие вычисления производятся суммированием расчетных величин, относящихся к отдельным блокам.

Результаты и обсуждение

Покажем методику определения коэффициента устойчивости (1) на примере расчета грунтового массива, приведенного на рис.1.

Выбираем произвольный центр вращения O_1 и выполняем все необходимые расчеты относительно его положения в следующем порядке:

а) зададимся величиной $x_{O_1} = 1,0 \text{ м}$;

б) вычислим из треугольника BO_1D

$$y_{O_1} = H + x_{O_1} \operatorname{tg} \gamma = 3 + 1 \cdot 0,444 = 3,444 \text{ м};$$

$$h_i^* = y_{O_1} - H; \text{ т.е. } h_1^* = 3,444 - 3,0 = 0,444 \text{ м};$$

в) вычислим значение радиуса-вектора R_1 (из треугольника AO_2M)

$$R_1 = \sqrt{x_{O_1}^2 + y_{O_1}^2} = \sqrt{(1,0)^2 + (3,444)^2} = 3,59; \quad R_1 = 3,59 \text{ м};$$

г) разобьем объем массива грунта скольжения (треугольная призма ABC) на четыре расчетных блока – 1, 2, 3, 4; при этом из треугольника CO_1D имеем

$$\sin \delta_1 = h_1^* / R_1 = 0,444 / 3,59 = 0,1237; \delta = 7^\circ 6';$$

далее из треугольника AO_1M имеем

$$\operatorname{tg} \psi_1 = 3,444 / 1,0 = 3,444; \psi_1 = 73^\circ 48';$$

при этом угол $\beta_1 = 90^\circ - (90^\circ - \psi_1) - \delta_1 = 67^\circ 42'$;

д) для расчета примем следующие свойства однородного грунтового массива (суглинистый грунт) $\omega_{np} = 28\%$ – природная влажность, $\gamma_\omega = 1,95$ т/м³ – его объемный вес; согласно [10] имеем: $\varphi_\omega = 15^\circ 30'$ – угол внутреннего трения; $C_\omega = 2,1$ т/м³ – общее сцепление грунта;

е) определим поверхность скольжения грунта при $R_1 = 3,59$ м и $\beta_1 = 67^\circ 42'$ по соответствующей геометрической формуле:

$$l_1 = (2\pi R_1 / 360^\circ) 67^\circ 42' = 4,24; l_1 = 4,24 \text{ м};$$

вычислим длину участка BC

$$l_1 = R_1 \cos \delta_1 - x_{O_1} = 2,56; l_1 = 2,56 \text{ м};$$

ж) вычислим силы сцепления на поверхности скольжения l_1

$$C_1 = l_1 C_\omega = 4,24 \cdot 2,1 = 8,9 \text{ т}.$$

Дальнейшее вычисление выполняем в таблице 1.

Таблица 1 – Определение коэффициента устойчивости для центра скольжения O_1

№ расчетных блоков	F_1 , т при $l_1 = 2,56$ м	$P_i = \gamma_\omega F_1$, т	α_i	$N_i = P_i \cos \alpha_i$, т	$N_i \operatorname{tg} \varphi$, т	$Q_i = P_i \sin \alpha_i$, т
1	$0,5(3+2,75) \cdot 0,64 = 1,84$	3,59	$22^\circ 18'$	3,321	0,921	1,362
2	$0,5(2,75+2,33) \cdot 0,64 = 1,626$	3,17	$34^\circ 24'$	2,616	0,818	1,791
3	$0,5(2,33+1,64) \cdot 0,64 = 1,270$	2,48	$54^\circ 03'$	1,456	0,404	2,008
4	$0,5 \cdot 1,64 \cdot 0,64 = 0,525$	1,02	$75^\circ 48'$	0,250	0,069	0,989
			Σ	7,643	2,212	6,15

Коэффициент запаса устойчивости для однородного грунта определяется по формуле [10]:

$$K_{\text{зап},i} = \frac{(\sum N_i \operatorname{tg} \varphi) + C_i l_i}{\sum Q_i}. \quad (2)$$

По формуле (2) для центра вращения O_1 (по данным таблицы 1):

$$K_{\text{зап},1} = \frac{2,212 + 2,1 \cdot 4,24}{6,13} = 1,81.$$

В аналогичном порядке производят расчеты для других центров вращения O_2, O_3, O_4 .

При этом получены следующие значения коэффициентов: $K_2=1,68$, $K_3=1,66$, $K_4=1,78$.

Таким образом, имеем следующие результаты расчетов по центрам вращения O_1, O_2, O_3, O_4 :

$$\begin{aligned} R_1 = 3,59; \quad K_1 = 1,81; \quad R_2 = 4,37; \quad K_2 = 1,68; \\ R_3 = 5,27; \quad K_3 = 1,66; \quad R_4 = 6,22; \quad K_4 = 1,78. \end{aligned} \quad (3)$$

По данным (3) строим график интерполяции результатов (рис. 2).

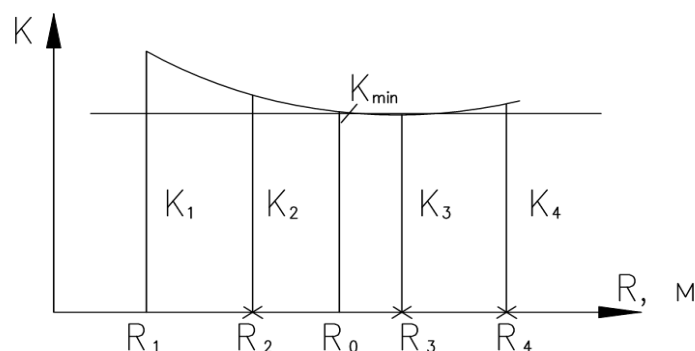


Рисунок 2 – Интерполяционный график для зависимости $K_i = f(R_i)$
[материал авторов]

По графику (рис.2) имеем $K = K_{\min} = 1,6$ (при $R_0 = 4,87$ м).

Величина радиуса вектора R_0 соответствует максимальному значению коэффициенты K_{\min} . Условием обеспечения общей устойчивости является соотношение $K \geq K_{\min}$. при наличии поверхностной временной нагрузки $P_{\text{соп}}$ необходимо использование выражения (1).

Заклучение

1. В данной работе выполнено исследование вопросов общей устойчивости бортов траншей и рвов прямоугольного профиля, создаваемых во время земляных работ при вскрытии инженерных (коммунальных) сетей для их ремонта и модернизации.

2. При определении расчетных коэффициентов устойчивости применен графоаналитический метод круглоцилиндрической поверхности скольжения профессора Н.Н. Маслова.

3. Для иллюстрации теории предлагаемого метода рассмотрен числовой пример без учета загрузки поверхности земли временной нагрузкой $P_{соор}$.

4. Предлагаемая методика расчета может быть использована при расчете подобных объектов исследования для разнообразных грунтов как однородной, так и неоднородной структуры, а также при проведении научных исследований в области механики грунтов, оснований и фундаментов при возведении различных инженерных сооружений, жилых и общественных зданий.

Литература:

1. Fox P.J. Analytical Solutions for General Two-Wedge Stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2021, 8 (147). (в международном журнале)
2. Fox P.J. Analytical Solutions for Three-Wedge Stability with Vertical Wedge Interfaces. *International Journal of Geomechanics*. 2021, 10 (21). (в международном журнале)
3. Li Y.-C. et al. Stability analysis of slurry trenches in similar layered soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013, 12 (139), 2104–2109. (в международном журнале)
4. Rajesh S. et al. Investigation of a landslide in Russia - Finite element and probabilistic approach. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2010, 4 (4), 517–525. (в международном журнале)
5. Zicarelli M., Rosone M. Stability of embankments resting on foundation soils with a weak layer. *Geosciences (Switzerland)*. 2021, 2 (11), 1–16. (в международном журнале)
6. Черныш А. С., Губарев С. А. Учет реологических особенностей грунта. *Вектор Геонаук*. 2018, 1(1), 5–7. (в русскоязычном журнале)
7. Киричек Ю. О., Кочан С. М. Устойчивость склонов на просадочных грунтах. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2006, 34–35, 55–56. (в русскоязычном журнале)
8. Выскребенцев В.С. Прочностные свойства лёссовых просадочных грунтов при статических и динамических нагрузках. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016, 3, 38–42. (в русскоязычном журнале)
9. Ухов С.Б. и др. *Механика грунтов, основания и фундаменты*. М.: Издательство «Высшая Школа». 2002, 566 с.
10. Маслов Н. Н. *Основы инженерной геологии и механики грунтов*. М.: Мир, 1987, 551 с.
11. Цытович Н.А. *Механика грунтов*. М.: Либроком. 2009, 274 с.
12. Ахмедиев С.К., Михайлов В.Ф., Куанов И.С. Исследование напряженно-деформированного состояния неразрезных балок на упруго-оседающих опорах. *Труды Университета*. 2019, 2 (75), 87–90. (в русскоязычном журнале)

References:

1. Fox PJ (2021) *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 147(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002508. (in Eng.)
2. Fox PJ (2021) *Journal of Geomechanics* 21(10). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002126. (in Eng.)

3. Li Y-C, Pan Q, Cleall PJ, Chen Y-M, Ke H (2013) *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139(12):2104–2109. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000958. (in Eng.)
4. Rajesh S, Krajewski W, Bormann A, Phanikumar BR (2010) *Journal of Geotechnical Engineering* 4(4):517–25. DOI: 10.3328/IJGE.2010.04.04.517-525. (in Eng.)
5. Zicarelli M, Rosone M (2021) *Geosciences (Switzerland)* 11(2):1–16. DOI: 10.3390/geosciences11020086. (in Eng.)
6. Chernyish A.S., Gubarev S A. *Uchet reologicheskikh osobennostey grunta [Consideration of geological features of the soil]* *Vektor Geonauk = Vector of Geosciences*. 2018, 1(1), 5–7. (in Russ.)
7. Kirichek Yu.O., Kochan S.M. *Ustoychivost sklonov na prosadochnyih gruntah [Stability of slopes on subsident soils]* *Vestnik Harkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta = Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*. 2006, 34–35, 55–56. (in Russ.)
8. Vyiskrebentsev V.S. *Prochnostnyie svoystva lYossovyyih prosadochnyih gruntov pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkah [Strength properties of loess subsidence soils under static and dynamic loads]* *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016, 3, 38–42. (in Russ.)
9. Uhov S. B. i dr. (2002) *Mehanika gruntov, osnovaniya i fundamenty [Soil mechanics, foundations and foundations]* – М.: Izdatelstvo «Vysshaya Shkola», 566. (in Russ.)
10. Maslov N. N. (1987) *Osnovyi inzhenernoy geologii i mehaniki gruntov [Fundamentals of engineering geology and soil mechanics]* – М.: Mir, 551. (in Russ.)
11. Tsyitovich N. A. (2009) *Mehanika gruntov [Soil mechanics]* – М.: Librokom, 274. (in Russ.)
12. Ahmediev S.K., Mihaylov V.F., Kuanov I.S. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya nerazreznnykh balok na uprugooosedayuschih oporah [Investigation of the stress-strain state of continuous beams on elastic-settling supports]* *Trudy Universiteta = Proceedings of the University*. 2019, 2 (75), 87–90. (in Russ.)

**С.К. Ахмедиев¹, М.Ж. Бакиров¹, Г.Д. Таженова¹,
В.Ф. Михайлов^{1*}, И.С. Куанов¹**

¹А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

Авторлар туралы мәліметтер:

Ахмедиев Серик Кабултаевич – техника ғылымдарының кандидаты, «Механика» кафедрасының доценті, А.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан
<https://orcid.org/0000-0003-4393-3559>, email: s_ahmediev@mail.ru

Бакиров Мади Жетписбаевич – техника ғылымдарының кандидаты, «Механика» кафедрасының меңгерушісі, А.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан
<https://orcid.org/0000-0002-2308-0678>, email: madybacirov@rambler.ru

Таженова Гульзада Даулетхановна – техника ғылымдарының кандидаты, «Механика» кафедрасының доценті, А.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан
<https://orcid.org/0000-0001-5512-2724>, email: gulzada_2604@mail.ru

Михайлов Валентин Феликсович – техника ғылымдарының кандидаты, «Механика» кафедрасының доценті, А.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан
<https://orcid.org/0000-0002-2588-9438>, email: v.mihaylov@kstu.kz

Куанов Иса Серікұлы – «Механика» кафедрасының ассистенті, А.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан
<https://orcid.org/0000-0002-9827-5728>, email: isa_kuan@mail.ru

ТОПЫРАҚ ЕРНЕУЛЕРІНІҢ, ТРАНШЕЯЛАРДЫҢ ЖӘНЕ ОРЛАРДЫҢ ЖАЛПЫ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ ӘДІСІ

Аңдатпа. Жұмыста топырақ борттарының, траншеялар мен арықтардың жалпы тұрақтылығын зерттеу әдістерінің бірі қарастырылған. Өз салмағынан басқа аралас құрылыстардан (ғимараттардан) «қосымша күш», ішкі үйкеліс бұрышын және «борттардағы» көп қабатты топырақ массивінің ілінісу күшін ескеретін топырақ массивінің орнықтылық қорының коэффициентін есептеу үшін талдамалық өрнек келтірілген. Дөңгелек цилиндрлік сырғанау әдісі қолданылады.

Түйін сөздер: топырақ борттарының орнықтылығы, орнықтылық қорының коэффициенті, топырақтардағы ілінісу күші, топырақ массиві, дөңгелек цилиндрлік сырғанау бетінің әдісі.

**S.K. Akhmediev¹, M.Zh. Bakirov¹, G.D. Tazhenova¹,
V.F. Mikhailov^{1*}, I.S. Kuanov¹**

¹Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, Kazakhstan

Information about authors:

Akhmediev Serik Kabultaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Karaganda Technical University named after A.Saginov, Karaganda, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0003-4393-3559>, email: s_ahmediev@mail.ru

Bakirov Madi Zhetpisbayevich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanics, Karaganda Technical University named after A.Saginov, Karaganda, Kazakhstan.

<https://orcid.org/0000-0002-2308-0678>, email: madybacirov@rambler.ru

Tazhenova Gulzada Dauletqhanovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Karaganda Technical University named after A.Saginov, Karaganda, Kazakhstan.

<https://orcid.org/0000-0001-5512-2724>, email: gulzada_2604@mail.ru

Mikhailov Valentin Feliksovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Karaganda Technical University named after A.Saginov, Karaganda, Kazakhstan.

<https://orcid.org/0000-0002-2588-9438>, email: v.mihaylov@kstu.kz

Kuanov Isa Serikovich – Assistant of the Department of Mechanics, Karaganda Technical University named after A.Saginov, Karaganda, Kazakhstan.

<https://orcid.org/0000-0002-9827-5728>, email: isa_kuan@mail.ru

METHOD OF INVESTIGATION OF THE GENERAL STABILITY OF SOIL BOARDS, TRENCHES AND DITCHES

Abstract. *The paper considers one of the methods for studying the general stability of soil boards, trenches and ditches. An analytical expression is given for calculating the stability coefficient of a soil massif, taking into account, in addition to its own weight, also the "surcharge" from adjacent structures (buildings), the angle of internal friction and the adhesion force of a multilayer soil massif in the "sides". The round-cylindrical sliding surface method is applied.*

Keywords: *stability of soil boards, stability coefficient, adhesion force in soils, soil massif, the method of a circular cylindrical sliding surface.*