

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТКОСОВ И УСТУПОВ ГРУНТОВЫХ ВЫЕМОК НА ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ

С.Л. Туманов, С.А. Калиновский, Ю.М. Фетисов, А.Р. Рисунов

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

В работе представлены результаты исследования влияния углов наклона уступов и откосов на их взаимную устойчивость. Определяются величины коэффициентов устойчивости откосов в зависимости от угла наклона уступов, а также величины коэффициентов устойчивости каждого уступа в зависимости от угла наклона откоса и местоположения уступа на нём. Оценка напряженно-деформированного состояния рассматриваемых грунтовых массивов и определение коэффициентов устойчивости (с определением форм и положений наиболее вероятных поверхностей скольжения) проведены посредством компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов и учётом величины коэффициента бокового давления грунта. Рассмотрены различные сочетания высот уступов и их углов наклона, при этом установлено, что максимальная разница между коэффициентами устойчивости прямолинейного и двухступенчатого откосов наблюдается в случае, когда нижний уступ имеет наибольшую высоту и угол наклона. Верхний уступ при этом можно считать изолированным. Устойчивость нижнего уступа для каждого из рассмотренных вариантов имеет зависимость от его угла наклона и угла наклона верхнего уступа. Таким образом, обнаружено, что представляется возможность подобрать такие сочетания значений углов наклона их уступов и высот при проектировании откосов, при которых их устойчивость будет максимальной. Подбор этих геометрических параметров в свою очередь позволяет при проектировании на откосах различных сооружений правильно спланировать работы по выравниванию формы естественных откосов или созданию насыпей таким образом, что это окажет существенное влияние на повышение их эксплуатационной надёжности.

Ключевые слова: прямолинейный и двухступенчатый откосы, угол наклона уступа, высоты откоса и уступов, коэффициенты устойчивости откоса и уступов, метод конечных элементов, вертикальные, горизонтальные и касательные составляющие напряжений.

Результаты исследований взаимного влияния уступов и откосов двухступенчатых грунтовых выемок на их устойчивость приводятся в работах [1–4], где рассматриваются различные сочетания углов наклона откосов β и уступов α ($25^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$; $35^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$), причем каждому значению β соответствуют равные по величине углы α . Высоты верхнего и нижнего уступов h равны соответственно $h = \frac{1}{2}H - \frac{1}{2}H$; $h = \frac{1}{3}H - \frac{2}{3}H$; $h = \frac{2}{3}H - \frac{1}{3}H$, где H – высота откоса, которая берется для всех случаев фиксированной. В результате проведенных испытаний установлено, что устойчивость двухступенчатого откоса в значительной мере зависит от высоты нижнего уступа и при прочих равных условиях величина его коэффициента устойчивости K вырастает с увеличением высоты h примерно на 15–20%. То есть чем выше нижний уступ, тем более устойчив откос. Этому есть простое объяснение: нижний уступ играет роль контрфорса – «пригрузки» в основании откоса, тем самым повышая его общую устойчивость. При расчете устойчивости уступов верхний уступ можно рассматривать как изолированный и величина его коэффициента устойчивости практически равна величине K изолированного откоса. Что касается нижнего, то при фиксированной высоте H ,

с одной стороны, увеличение его высоты снижает его устойчивость, а с другой – вызывает уменьшение на него «нагрузки» (высота верхнего уступа уменьшается), что увеличивает его устойчивость. Суммарное влияние этих двух факторов делает устойчивость нижнего уступа практически неизменной для рассматриваемых сочетаний β , α и h при фиксированной высоте откоса.

Анализ проведенных исследований позволяет подобрать такие сочетания β , α и h , при которых будет обеспечена максимальная устойчивость, как откоса, так и его уступов.

В проделанной работе исследуется влияние углов наклона уступов на устойчивость двухступенчатых откосов и, наоборот, влияние откоса грунтовой выемки на устойчивость уступов. Для этого определяются величины коэффициентов устойчивости откосов K в зависимости от угла наклона уступов, а также величины K каждого уступа в зависимости от угла наклона откоса и местоположения уступа на нем. Форма и положение наиболее вероятных поверхностей разрушения откосов и уступов определяются из условия минимальности величины коэффициента устойчивости в каждой точке поверхности и зависят от физико-механических характеристик грунтовых масс [5], в частности в ряде работ [6–9] установлено значительное влияние на устойчивость откосов коэффи-

Основания и фундаменты, подземные сооружения

циента бокового давления грунта [10, 11]. Все расчеты выполняются на основе анализа напряженно-деформированного состояния грунтового массива с учетом всех трех составляющих напряжений в каждой точке приоткосной зоны для значений коэффициентов бокового давления, изменяющихся в пределах $0,25 \leq \xi_0 \leq 1$ и безразмерного параметра устойчивости $\lambda = 0,2; 0,6; 1,0$, который зависит от физико-механических характеристик грунтового массива [5].

$$\lambda = 2c\gamma^{-1}H^{-1}\text{ctg}\varphi, \quad (1)$$

где c, γ, φ – сцепление, объемный вес, угол внутреннего трения грунта.

Для определения напряжений применяются теория функций комплексного переменного и метод конечных элементов (МКЭ) [12].

Известно, что применение МКЭ предусматривает замену сплошной среды дискретной моделью. Неточности в определении ее размеров, количества элементов и граничных условий значительно искажают горизонтальные и особенно касательные составляющие напряжений, которые могут быть в несколько раз больше или меньше аналогичных напряжений, вычисленных для сплошной среды [5].

Проведенные нами исследования показали, что замена полубесконечной области конечной расчетной моделью с жестким закреплением в горизонтальном направлении ее вертикальных границ предопределяет при любых размерах модели завышение горизонтальных составляющих напряжений по сравнению с аналогичными напряжениями, возникающими в приоткосной зоне и определенными с помощью теории функций комплекс-

ного переменного [5]. Устранить этот «эффект полуплоскости» можно посредством задания точкам, принадлежащим вертикальным границам расчетной модели, некоторым специальным образом определенным горизонтальным перемещениям [4].

Установлено [4], что выбор граничных условий, накладываемых на конечно-элементную схему, при решении задач по определению устойчивости откосов должен быть осуществлен на основе точного решения задач теории упругости для весомой изотропной полуплоскости с трапециевидным вырезом на ее границе.

Эти напряжения используются при определении вышеуказанных горизонтальных перемещений вертикальных границ расчетной модели. Задав узлам, лежащим на вертикальных границах модели, горизонтальные, пропорциональные глубине перемещения и построив графики их зависимости от горизонтальных составляющих напряжений для различных точек приоткосной зоны, определим такие значения перемещений, при которых величины напряжений, определенные МКЭ, будут с достаточной степенью точности совпадать с соответствующими напряжениями, найденными на основе точного решения. Определенные таким образом граничные условия позволяют исключить ошибки, связанные с выбором размеров расчетной схемы, количества и размеров элементов, неоднородностью сетки разбиения.

На рис. 1 изображена расчетная схема прямолинейного и двухступенчатого откосов ($\beta = 35^\circ$; $\alpha = 60^\circ$) с высотами верхнего и нижнего уступов, равными $h = \frac{1}{2}H - \frac{1}{2}H$, состоящая из 847 элемен-

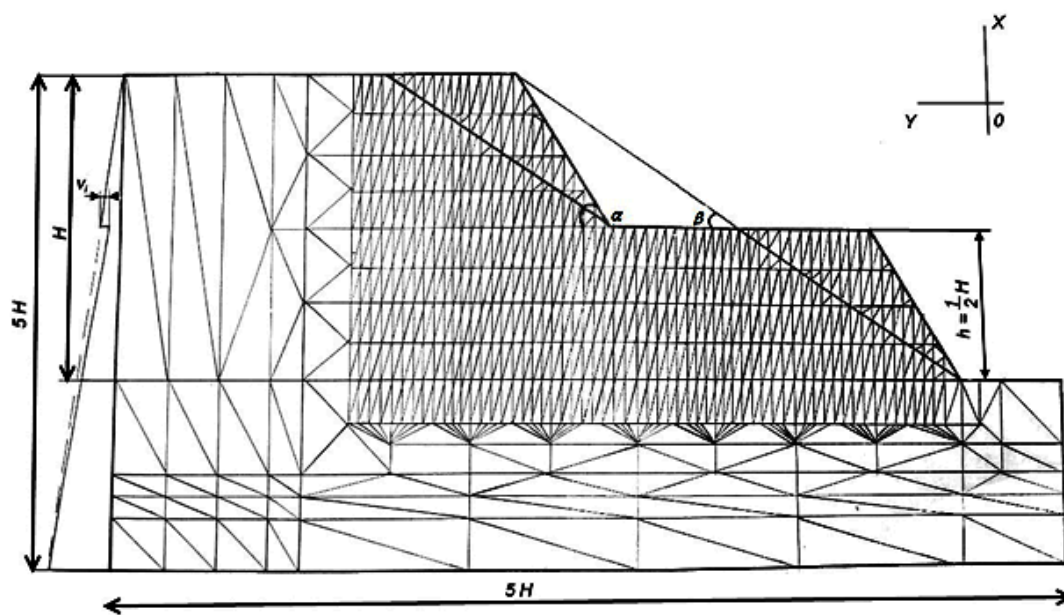


Рис. 1. Схема МКЭ к расчету устойчивости прямолинейного и двухступенчатого откосов

$$\text{при } \beta = 35^\circ, \alpha = 60^\circ, h = \frac{1}{2}H - \frac{1}{2}H$$

тов, которые соединены в 465 узлах. Граничные условия по краям расчетной схемы наложены исходя из исследований, изложенных выше, то есть вертикальным границам заданы горизонтальные перемещения v_i .

Аналогичные расчетные схемы разработаны и для других сочетаний β , α , h . При фиксированном угле наклона откоса исследовалось влияние углов наклона уступов, так, например, для $\beta = 35^\circ$ при неизменном угле верхнего уступа угол наклона нижнего уменьшался от 75° до 35° .

То есть α_{350} был равен углу наклона откоса β ($\alpha_{350} = \beta = 35^\circ$). И, наоборот, при неизменном угле наклона нижнего уступа угол наклона верхнего уменьшался от 75° до 35° , соответственно также и у нижнего. Расчетные схемы предоставлены на рис. 2 и 3. Высоты верхнего и нижнего уступов были равны $\frac{1}{3}H$ и $\frac{2}{3}$ и наоборот. Кроме того, на рис. 2 изображены наиболее вероятные поверхности разрушения при $\lambda = 0, 2, 0, 4$ и эпюры удерживающих и сдвигающих сил (для одноступенчатого – пунктирные, для двухступенчатого – сплошные). Из рис. 2, 3 видно, что наличие нижнего уступа увеличивает удерживающие и сдвигающие силы в нижней части откоса, при этом поверхность разрушения отклоняется в сторону откоса. В верхней части указанные силы уменьшаются, а поверхность разрушения по сравнению с прямолинейным откосом отклоняется в сторону массива.

Таким образом, при увеличении углов наклона уступов разница в величинах коэффициентов ус-

тойчивости при фиксированном значении угла β возрастает, при уменьшении – величина K двухступенчатого борта стремится к величине коэффициента устойчивости прямолинейного. Так, если принять его величину K при $\beta = 35^\circ$ за условную единицу, то для различных углов наклона уступов при $n = 2$ и $h = \frac{1}{3}H - \frac{2}{3}H$ можно записать:

$$K : K_{\alpha=35^\circ} : K_{\alpha=45^\circ} : K_{\alpha=60^\circ} : K_{\alpha=75^\circ} = \\ = 1 : 1,09 : 1,15 : 1,20 : 1,25. \quad (2)$$

Аналогичные результаты дает исследование других сочетаний углов наклона борта и уступов, и максимальная разница в величинах коэффициентов устойчивости прямолинейного и двухступенчатого бортов составляет 30 % при $\beta = 25^\circ$ и $\alpha = 75^\circ$.

Анализ результатов расчетов позволил установить следующее:

1. Устойчивость двухступенчатого откоса в значительной мере зависит от угла наклона нижнего уступа и при прочих равных условиях величина его коэффициента устойчивости вырастает с увеличением угла α примерно на 15–30 %. То есть чем круче нижний уступ, тем более устойчив откос. Этому есть простое объяснение: нижний уступ играет роль контрфорса – «пригрузка» в основании откоса, тем самым повышая его общую устойчивость.

2. Исследование влияния откоса выемки на устойчивость уступов, проведенное также для различных сочетаний β , α и h , и выполнение соответствующих расчетов позволило установить, что верхний уступ можно рассматривать как изолиро-

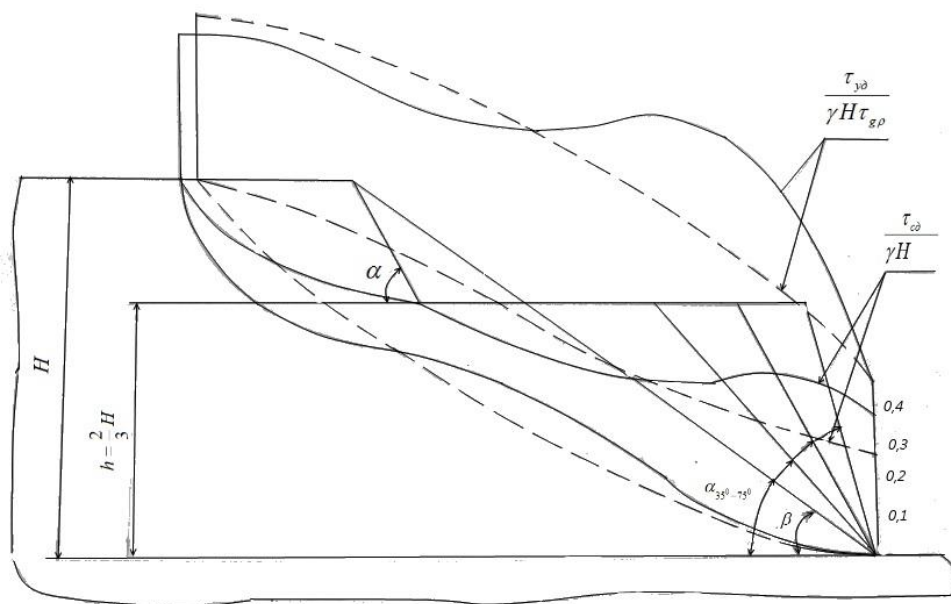


Рис. 2. Схема к расчету устойчивости прямолинейного и двухступенчатого откосов при $\beta = 35^\circ$, $35^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$

ванный и величина его коэффициента устойчивости практически равна величине K изолированного откоса, то есть увеличение угла наклона нижнего уступа на его устойчивость никак не влияет. А вот уменьшение угла наклона верхнего уступа уменьшает устойчивость нижнего уступа при различных сочетаниях β, α и h при прочих равных условиях от 15–25 %. Это объясняется тем, что уменьшение угла наклона увеличивает нагрузку на нижний уступ, что уменьшает его устойчивость.

3. Из проведенных выше исследований является очевидной возможность подбора таких сочетаний β, α и h , при которых будет обеспечена максимальная устойчивость как откоса, так и его уступов.

Литература

1. Туманов, С.Л. К расчету устойчивости уступов и откосов грунтовых выемок и учете их взаимного влияния / С.Л. Туманов // Ежегод. науч.-техн. конф. проф.-препод. состава и студентов ВолгГАСУ: матер. конф., Волгоград, 29–30 апр. 2014 г.: в 2 ч. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2014. – С. 73–74.
2. Туманов, С.Л. Исследование системы «откос – уступ» с учетом их взаимного влияния / С.Л. Туманов, Л.С. Туманов // Инженерные проблемы современного материаловедения и дорожного строительства: материалы науч.-практ. конф., г. Волгоград, 16–17 мая 2007 г. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2007. – С. 142–143.
3. Туманов, С.Л. Исследование устойчивости двухступенчатых откосов / С.Л. Туманов, А.Ю. Рагозин // Градостроительство: тез. докл. по итогам науч.-техн. конф. ВолгГАСА. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСА, 1996. – С. 37–39.
4. Цветков, В.К. Взаимное влияние уступов и бортов карьеров на их устойчивость / В.К. Цветков, С.Л. Туманов // ФТПРПИ. – 1988. – № 2. – С. 103–108.
5. Цветков, В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов / В.К. Цветков. – Волгоград: Нижне-Волжское кн. изд-во, 1979. – С. 238.
6. Влияние коэффициента бокового давления грунта на степень устойчивости однородного откоса / О.А. Богомолова, Б.С. Бабаханов, С.Ю. Калашиников и др. // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архит. – 2013. – Вып. 30(49). – С. 39–49;
7. Оценка величины коэффициента запаса устойчивости однородного нагруженного откоса на основе анализа напряженного состояния грунтового массива при различных значениях коэффициента бокового давления грунта / А.Н. Богомолов, С.А. Калиновский, О.А. Богомолова и др. // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архит. – 2013. – Вып. 30(49). – С. 7–12.
8. Богомолов, А.Н. Расчет устойчивости откосов с учетом величины коэффициента бокового давления грунта / А.Н. Богомолов, С.А. Калиновский // Международная научно-практическая конференция, 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. 80–97.
9. Калиновский, С.А. Оценка влияния величины коэффициента бокового давления грунта на результаты расчетов грунтовых массивов по первому предельному состоянию: автореф. дис. ... канд. техн. наук: (05.23.02) / С.А. Калиновский. – Волгоград, 2013. – 28 с.
10. Богомолов, А.Н. Анализ методов определения коэффициента бокового давления грунта (экспериментальные методы) / А.Н. Богомолов и др. // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, ВолгГАСУ, 2012. – С. 33–57.
11. Богомолов, А.Н. Анализ методов определения коэффициента бокового давления грунта (аналитические методы) / А.Н. Богомолов и др. // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, ВолгГАСУ, 2012. – С. 58–85.
12. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.Н. Богомолов и др. – № 2009613499 от 30 июня 2009 г.

Туманов Сергей Леонидович, кандидат технических наук, профессор 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», Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), sk0522@yandex.com.

Фетисов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения», Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), fetisow.yurij@yandex.ru.

Рисунов Андрей Романович, студент группы СУЗ-1-13, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), andreyrusunov@mail.ru.

Поступила в редакцию 4 февраля 2020 г.

INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF SLOPES AND LEDGES OF GROUND RECESSES ON THEIR STABILITY

S.L. Tumanov, tumserlen@yandex.ru

S.A. Kalinovskiy, sk0522@yandex.com

Yu.M. Fetisov, fetisow.yurij@yandex.ru

A.R. Risunov, andreyrisunov@mail.ru

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

The paper presents the results of studying the influence of the slope angles of ledges and slopes on their mutual stability. The values of the slope stability coefficients are determined depending on the slope angle of the ledges, as well as the values of the stability coefficients of each ledge depending on the slope angle and the location of the ledge on it. Evaluation of stress-strain state of the soil and determination of the coefficients of stability (definition of the forms and provisions, the most probable sliding surfaces) are carried out by computer simulation using the finite element method and taking into account the value of the coefficient of lateral earth pressure. Various combinations of ledge heights and slope angles are considered, and it is found that the maximum difference between the stability coefficients of straight and two-stage slopes is observed in the case when the lower ledge has the highest height and slope angle. The upper ledge can be considered isolated. The stability of the lower ledge for each of the considered options depends on its angle of inclination and the angle of inclination of the upper ledge. Thus, it is found that it is possible to choose such combinations of values of the slope angles of their ledges and heights, when designing slopes, with which their stability will be the maximum one. When designing various structures on the slopes, the selection of these geometric parameters helps to correctly plan the work on leveling the shape of natural slopes or creating embankments in such a way that it will have a significant impact on improving their operational reliability.

Keywords: rectilinear two-stage slopes, slope angle of the ledge, height of the slope and ledges, stability coefficients of the slope and ledges, finite element method, vertical, horizontal and tangential stress components.

References

1. Tumanov S.L. [To the Calculation Stability of Ledges And Slopes of Ground Recesses and Taking into Account their Mutual Influence]. *Ezhegod. nauch.-tekhn. konf. prof.-prepod. sostava i studentov VolgGASU* [Annual Scientific and Technical Conference of the Faculty and Students of VolgGASU]. Volgograd, izd-vo VolgGASU Publ., 2014, part 1, pp. 73–74. (in Russ.)
2. Tumanov S.L., Tumanov L.S. [Study of the “Slope-Ledge” System Taking into Account their Mutual Influence]. *Inzhenernyye problemy sovremennogo materialovedeniya i dorozhnogo stroitel'stva: materialy nauch-proyekt. konf., Volgograd, 16–17 maya 2007 g.* [Engineering Problems of Modern Materials Science and Road Construction: Materials of the Scientific and Practical Conference Volgograd, May 16–17, 2007], Volgograd, VolgGASU Publ., 2007, pp. 142–143. (in Russ.)
3. Tumanov S.L., Ragozin A.Yu. [The Study of the Stability of Two-Stage Slopes]. *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 VolgGASA]. Volgograd, VolgGASA Publ., 1996, pp. 37–39. (in Russ.)
4. Tsvetkov V.K., Tumanov S.L. [Mutual Influence of Ledges and Sides of Quarries on their Stability]. *FTPRPI*, 1988, no. 2, pp. 103–108. (in Russ.)
5. Tsvetkov V.K. *Raschet ustoychivosti otkosov i sklonov* [Calculation of Slope Stability]. Volgograd, Nizhne-Volzhsckoye Kn. Izd. Publ., 1979. 238 p.
6. 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]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Construction. Ser. Construction and Architecture*, 2013, iss. 30(49), pp. 39–49. (in Russ.)
7. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A., Bogomolova O.A., Prokopenko A.V., Ivanov A.A. [Estimation of the Value of the Stability Margin Coefficient of a Homogeneous Loaded Slope Based on the Analysis of the Stress State of the Soil Mass at Different Values of the Lateral Pressure Coefficient of the Soil]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Construction. Ser. Construction and Architecture*, 2013, iss. 30(49), pp. 7–12. (in Russ.)
8. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A. [Calculation of Slope Stability Taking into Account the Value of the Lateral Soil Pressure Coefficient]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 55-letiyu kafedry stroitel'nogo proizvodstva i geotekhniki PNIPU i 60-letiyu kafedry gidrotekhnicheskikh*

i zemlyanykh sooruzheniy VolgGASU: mater. konf., 10–13 fev. 2015 g. [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: mater. Conf., February 10–13, 2015]. Volgograd, VolgGASU Publ., 2015, pp. 80–97. (in Russ.)

9. Kalinovskiy S.A. *Otsenka vliyaniya velichiny koeffitsiyenta bokovogo davleniya grunta na rezul'taty raschëtov gruntovykh massivov po pervomu predel'nomu sostoyaniyu. Avtoref. kand. tekhn. nauk* [Evaluation of the Influence of the Value of the Coefficient of Lateral Soil Pressure on the Results of Calculations of Soil Masses for the First Limit State. Abstract of cand. sci. dis.]. Volgograd, 2013. 28 p.

10. 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 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [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.)

11. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A., Bogomolova O.A., Ushakov A.N., Prokopenko A.V. [Analysis of Methods for Determining the Lateral Soil Pressure Coefficient (Analytical Methods)]. *Inzhenernyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [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.)

12. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Nestratov M.Yu. *Ustoychivost' (napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye)* [Sustainability (Stress-strain state)]. Certificate on the State Registration of the Computer Program Russian Federation, no. 2009613499, Application 30.07.2009.

Received 4 February 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние геометрических параметров откосов и уступов грунтовых выемок на их устойчивость / С.Л. Туманов, С.А. Калиновский, Ю.М. Фетисов, А.Р. Рисунوف // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 33–38. DOI: 10.14529/build200205

FOR CITATION

Tumanov S.L., Kalinovskiy S.A., Fetisov Yu.M., Risunov A.R. Influence of Geometrical Parameters of Slopes and Ledges of Ground Recesses on Their Stability. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 33–38. (in Russ.). DOI: 10.14529/build200205