Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Цветкова Е.В., Подтелков В.В. Особенности расчета устойчивости однородных и слоистых нагруженных грунтовых откосов на основе анализа их напряженного состояния // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 93–105. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.10

Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Tsvetkova E.V., Podtelkov V.V. The features of the calculation stability of homogeneous and layered ground slope laden based on analysis of stress state. *PNRPU Bulletin Construction and architecture*. 2016. Vol. 7, No. 2. Pp. 93-105. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА Т. 7, № 2, 2016 PNRPU BULLETIN CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/



DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.10 УДК 624.131

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОРОДНЫХ И СЛОИСТЫХ НАГРУЖЕННЫХ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, Е.В. Цветкова, В.В. Подтелков

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, Волгоград, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 18 февраля 2016 Принята: 09 марта 2016 Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

однородные и слоистые откосы, коэффициент запаса устойчивости, напряженное состояние, физико-механические свойства грунтов, коэффициент бокового давления, графические зависимости

аннотация

Рассмотрены некоторые особенности расчета величины коэффициента запаса устойчивости однородных и слоистых откосов. Определено, что влияние коэффициента бокового давления на устойчивость нагруженных однородных откосов незначительно, и этот коэффициент можно принять равным 0,75. Для угла откоса $\beta = 15^{\circ}$ установлена зона влияния равномерно распределенной нагрузки, получены зависимости коэффициента устойчивости от интенсивности нагрузки, расстояния ее от вершины откоса, величины приведенного давления связности σ_{ca} , с уменьшением которого (уменьшением сцепления или увеличением плотности грунта, а также высоты откоса) величина *K* уменьшается. Получена формула для определения коэффициента устойчивости откоса, когда ширина нагрузки *b* не превышает его высоту *h*.

© ПНИПУ

© Богомолов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: banzaritcyn@mail.ru. Цветкова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: elentsvetkova@yandex.ru. Подтелков Василий Владимирович – кандидат технических наук, профессор, докторант, e-mail: vvp2000@mail.ru.

Aleksandr N. Bogomolov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: banzaritcyn@mail.ru. Oksana A. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: banzaritcyn@mail.ru. Elena V. Tsvetkova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: elentsvetkova@yandex.ru. Vasilii V. Podtelkov – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: vvp2000@mail.ru.

THE FEATURES OF THE CALCULATION STABILITY OF HOMOGENEOUS AND LAYERED GROUND SLOPE LADEN BASED ON ANALYSIS OF STRESS STATE

A.N. Bogomolov, O.A. Bogomolova, E.V. Tsvetkova, V.V. Podtelkov

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Volgograd, Russian Federation

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 18 February 2016 Accepted: 09 March 2016 Published: 30 June 2016	The article describes some of the features of calculating the value of the safety factor of homogeneous and layered slope. It was found that the influence of lateral pressure coefficient on the stability of loaded homogeneous slopes slightly and this factor
<i>Keywords:</i> homogeneous and stratified slopes, stability, safety factor, the state of stress, physical and mechanical properties of soils, the lateral pressure coefficient, depending on araphics	can be taken as 0,75. To set the angle of the slope zone of influence of a uniformly dis- tributed load, obtained dependence of the stability of the load rate, its distance from the top of the slope, the value of the reduced pressure σ sv connectivity, with the decrease of which (decrease adhesion or increase soil density and slope height), the value of <i>K</i> de- creases. The formula for determining the factor of stability of the slope, where the load does not exceed the width <i>b</i> of the height <i>h</i> .
3.41	© PNRPU

Одним из главных вопросов, связанных с определением степени устойчивости нагруженных откосов и размеров возможных призм обрушения, является построение наиболее вероятной поверхности разрушения (НВПР).

Считается общепринятым, что величина коэффициента запаса устойчивости K откоса определяется как отношение сумм удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль наиболее вероятной поверхности разрушения, которая, в силу названия, должна определяться таким образом, чтобы величина K имела минимальное значение. В общем случае величина K определяется как отношение двух криволинейных интегралов по линии разрушения. Если s – дуговая координата на линии l, форма и положение которой известны, то криволинейные интегралы могут быть заменены определенными и величина коэффициента запаса устойчивости K может быть найдена по формуле

$$K = \left[\int_{0}^{1} \tau_{ya}(s,t) ds\right] \cdot \left[\int_{0}^{1} \tau_{ca}(s,t) ds\right]^{-1}.$$
 (1)

Удерживающие τ_{yq} и сдвигающие τ_{cq} касательные напряжения в каждой точке приоткосной зоны, входящие в соответствующие подынтегральные выражения в формуле (1), определяются по известным формулам теории упругости через напряжения σ_y , σ_x , τ_{xy} . Кроме того, они зависят от угла наклона α наиболее вероятной площадки сдвига в рассматриваемой точке приоткосной области, вдоль которой выполняется условие

$$K^{T} = K_{\min}^{T} \,. \tag{2}$$

Подставляя значения $\tau_{y_{d}}$ и $\tau_{c_{d}}$ в условие прочности Кулона [1] и проводя несложные преобразования, получим:

Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Цветкова Е.В., Подтелков В.В. / Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура Т. 7, № 2 (2016) 93–105

$$\frac{K}{\mathrm{tg}\,\varphi} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + (\sigma_y - \sigma_x)\cos 2\alpha + 2\tau_{xy}\sin 2\alpha + 2\sigma_{_{\mathrm{CB}}}}{(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\alpha + 2\tau_{xy}\cos 2\alpha},\tag{3}$$

где $\sigma_{c_{\rm R}}$ – приведенное (в долях γh) давление связности, $\sigma_{c_{\rm R}} = c(\gamma h t g \phi)^{-1}$; h – высота откоса.

Исследуя выражение (3) на экстремум, определим величину угла α, при котором выполняется условие (2):

$$\sin 2\alpha = 2N\tau_{xy} + (\sigma_y - \sigma_x)\sqrt{\frac{1}{L} - N^2}, \qquad (4)$$

где $L = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2$; $N = (\sigma_y + \sigma_x + 2\sigma_{cB})^{-1}$; α – угол между осью Ox и площадкой, вдоль которой коэффициент устойчивости в рассматриваемой точке минимален.

Анализ выражения (4) показывает, что в любой точке приоткосной области имеются две площадки сдвига с одинаковым минимальным по величине значением K^{T} . Знаки синусов углов наклона этих площадок к оси *Ox* определяются формулой (4), а знаки косинусов в выражении (3) следует принимать такими, чтобы выполнялось условие (2).

Для построения наиболее вероятной (наиболее опасной) поверхности разрушения (здесь уместно говорить о следе НВПР, так как рассматривается плоская задача) следует последовательно выполнить несколько процедур: в окрестности места перехода откоса в подошву (здесь наблюдаются концентрации напряжений и именно здесь находятся точки, в которых $K^T \to K_{min}^T$) при помощи вычислений определяется точка, где выполняется условие (2); через эту точку, расположенную вблизи контура откоса, проводится отрезок прямой, образующий с осью Ox угол α , определенный по формуле (4) (длина отрезка зависит от высоты откоса и масштаба чертежа); для точки, расположенной на другом конце отрезка, снова вычисляем угол α и под этим углом через середину данного отрезка проводим новый отрезок. Продолжаем данную процедуру до тех пор, пока последний отрезок так, чтобы отрезки ломаной были касательными к этой линии.

Из формул (1)–(4) следует, что положение и форма наиболее опасной поверхности разрушения зависят от высоты откоса и угла его заложения, физико-механических характеристик слагающих грунтов (объемный вес γ , удельное сцепление *c*, угол внутреннего трения φ , коэффициент бокового давления ξ_0 , модуль деформации E_0). В общем случае эти зависимости очень сложны. Однако если считать грунт однородным, то в случае идеально сыпучей среды (*c* = 0) поверхность разрушения совпадает с контуром откоса, если среда идеально связная ($\varphi = 0$), то эта поверхность максимально удалена от контура откоса, т.е. ширина призмы обрушения максимальна. При других значениях *c* и φ поверхность разрушения занимает промежуточное положение [2–4].

Если откос нагружен, то приходится рассматривать два типа сил: объемные (собственный вес грунта) и сосредоточенные, заменяющие распределенную нагрузку.

Напряжения от действия объемных сил можно представить в виде выражения $\sigma_{\gamma} = \gamma h f_1(x, y)$, а от сосредоточенных сил – $\sigma_q = q f_2(x, y)$, где $f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$ – безразмерные функции координат точек приоткосной зоны, определяемые аналитическим решением задач теории упругости.

Если приоткосная область находится под действием таких сил, то напряжения в любой точке области в рамках линейной теории упругости определяются алгебраической суммой соответствующих напряжений, т.е.

$$\frac{\sigma_{\gamma} + \sigma_q}{\gamma h} = f_1(x, y) + \frac{q}{\gamma h} f_2(x, y).$$
(5)

Из выражения (5) следует, что в случае нагруженного откоса формула (4) для определения угла α, так же, как и методика построения НВПР, не изменяются.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что степень устойчивости нагруженных откосов определяется следующими параметрами: высотой h и углом заложения откоса β ; интенсивностью нагрузки q, ее шириной b и расстоянием от вершины откоса a (рис. 1); объемным весом γ , удельным сцеплением c, коэффициентом бокового давления ξ_0 , углом внутреннего трения грунта ϕ ; отношением модулей деформации граничащих между собой слоев грунта. Значит, устойчивость однородных нагруженных откосов зависит от 9, а слоистых (с учетом физико-механических свойств каждого слоя) – как минимум (для двухслойного откоса) от 15 параметров.

Ниже приведены расчеты, результаты которых показывают, каким образом влияют численные значения указанных выше параметров на величину коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса. Отметим, что все вычисления выполнены при помощи компьютерной программы [5], разработанной в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете, в которой для определения напряжений формализован метод конечных элементов (МКЭ).



Puc. 1. Расчетная модель и ее геометрические размеры Fig. 1. Settlement model and its geometrical sizes

Рассмотрим откос при $\beta = 30^{\circ}$, a = 0, b/h = 0.5, $q/\gamma h = 1$, $\xi_o = 0.75$, $\varphi = 15^{\circ}$, $2\sigma_{cs} = 1.37$ и, используя компьютерную программу [5], построим след НВПР, а также рассчитаем величину соответствующего коэффициента запаса устойчивости.

Результат построения следа НВПР приведен на рис. 2, где он изображен сплошной линией, а величина коэффициента запаса устойчивости *K* оказалась равной 1,87.

Результаты аналогичных расчетов, выполненных для трех значений $\sigma_{cs1} = 1,37$, $\sigma_{cs2} = 2,74$, $\sigma_{cs3} = 5,48$, двух значений угла заложения откоса β (30° и 60°), $q/\gamma h = 1$ и a = 0, дали

возможность построить графические зависимости вида $K / tg \varphi = f(b)$, которые приведены на рис. 3.

Из анализа кривых следует, что при увеличении *b* от 0 до *h* (считается, что при b = 0 нагрузка отсутствует) коэффициент запаса устойчивости при любом значении φ уменьшается в 1,3–1,9 раза, но при $b/h \ge 1$ практически на изменяется.



Рис. 2. Положение следа НВПР в приоткосной области при ξ_o , равном 0, 75; 0,40 Fig. 2. The track location of the most probable failure surface in slope area when $\xi_o = 0, 75; 0,40$

Оказалось, что все кривые, изображенные на рис. 3, при 0 < b/h < 1 и a = 0 с точностью, не меньшей 96 %, могут быть аппроксимированы выражением



Fig. 3. The graphics of dependence of $K / tg \varphi = f(b)$ and $q/\gamma h = 1$ at different values of σ_{c_B} and β

Для получения расчетной формулы исходим из того, что если K_0 – коэффициент устойчивости ненагруженного откоса, K – нагруженного откоса при $b/h \ge 1$, а K_b – нагруженного откоса при 0 < b/h < 1, то для определения неизвестных коэффициентов A, B, Cимеем, очевидно, первые два условия: при b/h = 0 $K_b = K_0$; при b/h = 1 $K_b = K$. Третье условие получаем из следующих соображений. Из графиков рис. 3 следует, что при b/h = 0,25 для различных значений величин σ_{cB} , ϕ и β с погрешностью, не превышающей 5 %, выполняется равенство

$$K_b = \frac{K_0 + K}{2}.$$

Следовательно, для определения коэффициентов А, В, С имеем три уравнения:

$$K_0 = C;$$

$$K = A + B + C;$$

$$0,5K_0 + 0,5K = 0,0625A + 0,2B + C.$$
(7)

Определив эти коэффициенты и подставив их в формулу (6), получим:

$$K_{b} = \frac{1}{3} \left[3K_{0} + \left(K_{0} - K\right) \frac{b}{h} \left(4\frac{b}{h} - 7\right) \right].$$
(8)

Результаты вычислений показали, что использование этой формулы для определения коэффициента устойчивости откоса при 0 < b/h < 1 дает погрешность, не превышающую 5 %.

Оценим теперь влияние величины ξ_0 на степень устойчивости нагруженного откоса. Кроме кривых вида $K/tg \varphi = f(b)$, построенных при $\xi_0 = 0,75$, на рис. 3 изображены аналогичные кривые, построенные при $\xi_0 = 0,4$. Как видно из рис. 2, изменение величины расчетного параметра $\xi_0 = 0,75$ на величину $\xi_0 = 0,4$ лишь весьма незначительно повлияло на форму следа НВПР, а положение его в приоткосной области практически не изменилось. Если сравнивать численные значения соответствующих коэффициентов запаса устойчивости $K_{0,75} = 1,87$ и $K_{0,4} = 1,82$, то видно, что они отличаются всего на 2,7 %. Если учесть, что среднее значение коэффициента бокового давления для различных видов связных грунтов составляет 0,75 [6–10], то принятие этого значения ξ_0 при расчетах устойчивости нагруженных откосов, сложенных глинистыми грунтами, можно считать обоснованным.

Для выяснения влияния остальных переменных расчетных параметров на устойчивость нагруженных откосов выполнены расчеты величины $K/tg \phi$ при $\beta = 15^{\circ}$ и трех значениях $\sigma_{_{CB1}} = 1,37$, $\sigma_{_{CB2}} = 2,74$, $\sigma_{_{CB3}} = 5,48$. При этом принято, что величина отношения a/h изменяется от нуля до той величины, когда нагрузка не влияет на устойчивость откоса, b/h = 1, а $0 \le q/\gamma h \le 10$.

На рис. 4–7 изображены следы характерных НВПР, построенные в результате проведенных вычислений. Из рисунков следует, что наличие равномерно распределенной нагрузки или ее увеличение резко изменяет конфигурацию НВПР, уменьшая среднее значение ее радиуса кривизны и увеличивая ширину призмы возможного обрушения.



Рис. 4. Влияние нагрузки на форму и положение в приоткосной зоне НВПР Fig. 4. Load effect on the shape and position in slope area of the most probable failure surface



Рис. 5. Положение следа НВПР в приоткосной области при a/h = 0,5 и $q/\gamma h = 1;10$ Fig. 5. The track location of the most probable failure surface in slope area when a/h = 0,5 и $q/\gamma h = 1;10$



Рис. 6. Положение следа НВПР в приоткосной области при a/h = 2 и $q/\gamma h = 1;10$ Fig. 6. The track location of the most probable failure surface in slope area when a/h = 2 и $q/\gamma h = 1;10$



Рис. 7. Влияние расстояния нагрузки от вершины откоса на форму и положение в приоткосной зоне следа НВПР при a/h = 3; 4; $q/\gamma h = 10$



Если нагрузка находится вне зоны влияния на устойчивость откоса, то след поверхности разрушения аналогичен следу поверхности разрушения в ненагруженном откосе. При повышении нагрузки эта поверхность может выйти под нагрузку, резко увеличив ширину призмы обрушения.

С удалением нагрузки от вершины откоса след НВПР все больше заходит в подошву и становится линией с переменной кривизной.

Во всех случаях, когда нагрузка находится в зоне ее влияния на устойчивость откоса, след НВПР при $0 < q \le 10\gamma h$ выходит под нагрузку на расстоянии 0,62-0,85b от ее ближнего к откосу края.

На рис. 8 приведены графические зависимости, при помощи которых можно определить численные значения коэффициентов запаса устойчивости ненагруженного K_0 и нагруженного K откосов, размеры зоны влияния нагрузки (в рассматриваемом случае при $q = 10\gamma h$, a = 4,8h), величину предельно допустимой нагрузки (соответствует значению K = 1) и др. Анализ кривых показывает, что зависимость K от q криволинейна и величина коэффициента запаса устойчивости с увеличением интенсивности нагрузки максимально уменьшается при a = 0; при увеличении φ и a K возрастает. С уменьшением величины приведенного давления связности величина K убывает. Другими словами, при прочих равных условиях, как и следовало ожидать, K уменьшается с увеличением γ и h и уменьшением сцепления c (см. экспликацию формулы (3)).

Рассмотрим особенности расчета устойчивости слоистых откосов. Как отмечено выше, величина коэффициента запаса устойчивости слоистого нагруженного откоса зависит как минимум от 15 различных переменных расчетных параметров. Поэтому рассмотрим случай, когда след НВПР пересекает контакты слоев.

Пусть, например, разнородные слои слагающих грунтов ориентированы параллельно дневной поверхности откоса (рис. 9). Примем высоту откоса и удельный вес грунта за условные единицы h=1, $\gamma=1$, интенсивность равномерно распределенной нагрузки $q/\gamma h=1$, угол заложения откоса $\beta = 30^{\circ}$ и a = 0. Пусть коэффициенты бокового давления $\xi_{0} = 0.75$; 0,65; 0,50; 0,40; приведенное давление связности $\sigma_{cB} = 0.4$; 0,8; 1,2; 2, а углы внутреннего трения грунта $\phi = 18^{\circ}$, 22°, 30° и 35°.

Пусть в первом варианте отношение модулей деформации слоев следующее: $E_{o1}:E_{o2}:E_{o3}:E_{o4} = 4:3:2:1$ (слабое основание). Тогда расчетное значение коэффициента запаса устойчивости будет K = 1,36, а след НВПР имеет вид, изображенный на рис. 9 пунктирной линией, пересекающей слабое основание.

Во втором варианте $E_1: E_2: E_3: E_4 = 1:2:3:4$ (круговая перестановка слоев, прочное основание) K = 1,02, а след НВПР проходит в верхнем, наиболее слабом слое (см. рис. 9, сплошная линия).

Вычислим теперь коэффициент устойчивости рассматриваемого откоса как однородного с использованием средневзвешенных прочностных характеристик слоев. В нашем случае, как это принято для ненагруженных откосов, учитывая характеристики верхних

трех слоев, имеем: 1) для прочного основания $\phi_{cp} = \frac{1}{3}(18+22+30) = 23,3^{\circ}, 2\sigma_{cB}^{cp} = 0,8;$

2) для слабого основания $\phi_{cp} = \frac{1}{3} (35 + 30 + 22) = 29^{\circ}$, $2\sigma_{cB}^{cp} = 1,3$.

Коэффициент бокового давления принимаем равным 0,75, а $E_1 = E_2 = E_3 = E_4$.









Рис. 9. Положение следа НВПР в слоистом нагруженном откосе Fig. 9. The track location of the most probable failure surface loaded in a layered slope

Получены следующие результаты расчетов: в случае прочного основания K = 1, 41; в случае слабого – K = 2, 23, т.е. на 28 и 39 % больше их фактических значений (1,02 и 1,36).

Следовательно, в отличие от ненагруженных слоистых откосов обычный способ использования средневзвешенных характеристик грунтов неприемлем. В связи с этим предлагается следующий прием.

При прочном основании, когда след НВПР проходит в слабом слое, при расчетах следует принимать прочностные характеристики этого слоя, т.е. в рассматриваемом случае $\phi = 18^{\circ}$, $2\sigma_{c_{B}}^{c_{p}} = 0,4$.

При слабом основании, когда НВПР частично проходит в нем, при определении средневзвешенных характеристик учитывать характеристики основания, принимая условно его толщину равной высоте откоса *h*. Другими словами, в нашем случае

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{2} \left[(35+30+22) \frac{1}{3} + 18 \cdot 1 \right] = 23, 5^{\circ}, \quad \sigma_{cB}^{cp} = \frac{1}{2} \left[(2+1, 2+0, 8) \frac{1}{3} + 0, 4 \cdot 1 \right] = 0, 87,$$

Численные значения коэффициентов запаса устойчивости, вычисленные при указанных физико-механических свойствах слоев, получились равными: для прочного основания K = 0,93 (отличие от фактического коэффициента – 8,8 %); для слабого основания – K = 1,43 (отличие 6,8 %).

Исследования показали, что в случае падения слоев в сторону грунтового массива или откоса при условии, что след НВПР пересекает контакты слоев (т.е. ни частично, ни полностью не совпадает с контактами), качественная картина при определении величины коэффициента запаса устойчивости изменяется незначительно.

Поэтому при расчете устойчивости слоистых нагруженных откосов рекомендуется использовать результаты, полученные для соответствующих однородных откосов. Однако, в отличие от ненагруженных откосов, в случае прочного основания следует использовать характеристики наиболее слабого слоя, а в случае слабого основания при определении средневзвешенных физико-механических свойств пород – использовать характеристики основания, условно приняв его толщину равной h.

При частичном или полном совпадении следа НВПР с контактами слоев при оценке устойчивости слоистых нагруженных откосов и склонов следует использовать компьютерную программу [4]. В заключение отметим, что при застройке приоткосных территорий зданиями различной этажности приходится имеем дело с нагрузкой, интенсивность которой меняется «ступенями». На основании анализа результатов многочисленных расчетов установлено, что «ступенчатую» нагрузку можно заменять эквивалентной, равномерно распределенной нагрузкой. При этом если нагрузка возрастает с удалением от вершины откоса, то интенсивность равномерно распределенной нагрузки определяется как «средневзвешенная» (аналогично средневзвешенным характеристикам грунтов). Если максимум нагрузки соответствует ее середине или убывает с удалением от вершины откоса, то при расчетах средневзвешенную нагрузку следует увеличивать соответственно на 10 и 20 %.

Подтвердим эти рекомендации на конкретном примере. Пусть $\xi_o = 0,75$, $\varphi = 18^\circ$, $2\sigma_{_{CB}} = 4$, a = 0, общая ширина нагрузки b = 1,5h, которая разделена на три части шириною 0,5h с интенсивностью соответственно $q/\gamma h = 1$, 2, 3. Поскольку в этом случае «средневзвешенная» нагрузка $q_{_{CP}} = 2\gamma h$, то при расчете коэффициента запаса устойчивости в случае увеличения интенсивности нагрузки в сторону от вершины откоса следует принять $q = 2\gamma h$. Если максимум нагрузки соответствует середине отрезка длиной 1,5h, то $q = 2, 2\gamma h$, а при уменьшении нагрузки с удалением от вершины откоса $q = 2, 4\gamma h$.

Получены следующие результаты расчетов: при равномерно распределенной нагрузке интенсивностью $q = 2\gamma h$ величина коэффициента запаса устойчивости K = 1,80, а при ступенчатой нагрузке и увеличении ее интенсивности с удалением от вершины откоса несколько уменьшилась – до значения K = 1,76. Если $q = 2,2\gamma h$, то K = 1,71, а при ступенчатой нагрузке с ее максимумом в середине отрезка b = 1,5h величина коэффициента запаса несколько снизилась и составила K = 1,69. Если $q = 2,4\gamma h$, то K = 1,65 и, если нагрузка уменьшается с удалением от вершины откоса, K = 1,61. Иными словами, во всех случаях погрешность при замене ступенчатой нагрузки равномерно распределенной не превышает 2,5 %.

Выводы

1. Установлено, что влияние коэффициента бокового давления на устойчивость нагруженных однородных откосов, сложенных связным грунтом, в отличие от аналогичных ненагруженных откосов, незначительно и этот коэффициент можно принять равным 0,75, что соответствует его среднему значению для глинистых грунтов.

2. Для угла откоса $\beta = 15^{\circ}$ установлена зона влияния равномерно распределенной нагрузки, получены зависимости коэффициента устойчивости от интенсивности нагрузки, расстояния ее от вершины откоса, величины приведенного давления связности σ_{cB} , с уменьшением которого (уменьшением сцепления или увеличением плотности грунта, а также высоты откоса) величина *K* уменьшается и др.

3. Получена формула для определения коэффициента устойчивости откоса, когда ширина нагрузки b не превышает его высоту h. Показано, что при $b/h \ge 1$ коэффициент запаса устойчивости, при прочих равных условиях, постоянен.

При расчете устойчивости слоистых нагруженных грунтовых откосов, когда след НВПР пересекает контакты слоев, в отличие от ненагруженных откосов, следует: 1) в случае прочного основания использовать характеристики наиболее слабого слоя; 2) в случае слабого основания при определении средневзвешенных физико-механических свойств пород использо-

вать также свойства основания, условно принимая его толщину равной высоте откоса. При частичном или полном совпадении следа НВПР с контактами слоев, ввиду большого количества всевозможных вариантов, установление всех закономерностей невозможно и в каждом частном случае необходимо проведение соответствующих исследований.

Библиографический список

1. Coulomb C. Application des rigles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture // Memories de savants strangers de L'Academlie des sciences de Paris. – 1773.

2. Цветков В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов. – Волгоград: Нижне-Волж. книж. изд-во. – 1979. – 238 с.

3. Цветков В.К. Расчетные коэффициенты устойчивости грунтовых откосов и склонов // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2005.

4. Цветков В.К. Связь между напряженным состоянием и прочностными характеристиками грунтовых массивов // Материалы ежегод. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ (24–27 апреля 2007 г.): в 3 ч. Ч. 2: Естественные науки. Технология строительного производства. Тепло-, газо- и водоснабжение. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2008. – С. 185–187.

5. Богомолов А.Н. Устойчивость (Напряженно-деформированное состояние): свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.

6. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.

7. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1996. – 150 с.

8. Богомолов, А.Н., Шиян С.И., Богомолова О.А. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Естественные науки. – Вып. 6 (23). – С. 110–114.

9. Пономарев А.Б., Захаров А.В. Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2010. – Вып. 17 (36). – С. 119–122.

10. The use of synthetic materials in the highway engneering in the Urals / A.A. Bartolomey, A.N. Bogomolov, V.I. Kleveko, A.B. Ponomarev // Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Amsterdam, Netherlands, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1200.

References

1. Coulomb C. Application des rigles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. *Memories de savants strangers de L'Academlie des sciences de Paris*. 1773.

2. Tsvetkov V.K. Raschet ustoichivosti otkosov i sklonov [Calculation of stability of slopes and declivitys]. Volgograd: Nizhne-Volzhskoe knizhnoe izdatel'stvo. 1979. 238 p.

3. Tsvetkov V.K. Raschetnye koeffitsienty ustoichivosti gruntovykh otkosov i sklonov [The estimated coefficients for stability of soil slopes and declivitys]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi* nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruktsii i osnovanii fundamentov". Volgograd, 2005.

4. Tsvetkov V.K. Sviaz' mezhdu napriazhennym sostoianiem i prochnostnymi kharakteristikami gruntovykh massivov [The relationship between stress state and strength characteristics of soil layers]. *Materialy ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorskoprepodavatel'skogo sostava i studentov VolgGASU. Chast' 2. Estestvennye nauki. Tekhnologiia stroitel'nogo proizvodstva. Teplo-, gazo- i vodosnabzhenie.* Volgogradskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2008, pp. 185-187.

5. Bogomolov A.N. Ustoichivost' (Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie) [Stability (Stressstrain state)]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2009613499.

6. Vialov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov [Rheological fundamentals of soil mechanics]. Moscow: Vysshaia shkola, 1978. 447 p.

7. Bogomolov A.N. Raschet nesushchei sposobnosti osnovanii sooruzhenii i ustoichivosti gruntovykh massivov v uprugoplasticheskoi postanovke [Calculation of bearing capacity foundations of structures and stability of soil slopes in the elastic-plastic formulation]. Permskii go-sudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1996. 150 p.

8. Bogomolov A.N., Shiian S.I., Bogomolova O.A. K voprosu o minimal'nykh znacheniiakh koeffitsienta bokovogo davleniia gruntov [To the question of the minimum values of the coefficient of lateral soil pressure]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturnostroitel'nogo universiteta. Seriia: Estestvennye nauki*, 2007, iss. 6 (23), pp. 110-114.

9. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. Ispol'zovanie geotermal'noi energii dlia otopleniia i konditsionirovaniia zdanii [The use of geothermal energy for heating and cooling buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2010, iss. 17 (36), pp. 119-122.

10. Bartolomey A.A., Bogomolov A.N., Kleveko V.I., Ponomarev A.B. The use of synthetic materials in the highway engneering in the Urals. *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Amsterdam, Netherlands, 1999, vol. 2, pp. 1197-1200.