

УДК 624.131

О. А. Богомолова, А. В. Ечевский, Б. С. Бабаханов, С. И. Шиян**ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ НАГРУЖЕННЫХ ОТКОСОВ**

Предложен инженерный метод расчета величины коэффициента запаса устойчивости однородного откоса, находящегося под действием равномерно распределенной нагрузки различной интенсивности, ширины, при различном ее положении на откосе. Приведены простые графики и формулы, позволяющие проводить вычисления с достаточной для инженерной практики степенью точности. Приводятся примеры расчета и результаты сопоставления расчетных данных с данными о поведении реального объекта в натуре.

К л ю ч е в ы е с л о в а: инженерный метод расчета коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса, расчетные формулы и графики, примеры расчета.

An engineering method is proposed for calculating the value of the stability coefficient of a homogeneous slope under the action of a uniformly distributed load of varying intensity, for width, and for its various placing on a slope. Simple graphs and formulas to perform the calculations with a sufficient degree of accuracy for engineering practice are given. The paper gives examples of calculations and the comparison of the calculation data with the data on the behavior of an actual object in reality.

К е у w o r d s: engineering method for calculating the stability coefficient of loaded slope, calculation formulas and graphs, examples of calculations.

В работах [1, 2] сделаны предложения об использовании при расчете устойчивости откосов и склонов методов, основанных на анализе полей напряжений и перемещений, наводимых в грунтовом массиве, при приложении к нему дополнительной нагрузки. Рекомендации о целесообразности использования таких расчетных методов имеются и в нормативной литературе, например в [3].

Нами показано, что величина коэффициента запаса устойчивости в точке грунтового массива может быть определена как отношение работ удерживающих и сдвигающих сил, действующих в этой точке по наиболее вероятной площадке сдвига (скольжения):

$$K_{mi} = \frac{A_{iуд}}{A_{iсд}} = \frac{(F_{iуд}(\Delta_i - \delta_i) \cos \alpha_{iуд})}{(F_{iсд}(\Delta_i - \delta_i) \cos \alpha_{iсд})}, \quad (1)$$

где $F_{iуд}$, $F_{iсд}$ — соответственно удерживающая и сдвигающая сила в i -й точке; Δ_i и δ_i — перемещение i -й точки грунтового массива от действия внешней нагрузки и собственного веса грунта и только от собственного веса грунта; $\alpha_{iуд}$, $\alpha_{iсд}$ — углы между положительным направлением удерживающей и сдвигающей силы и направлением вектора полного перемещения соответственно в i -й точке массива.

Численные значения удерживающих и сдвигающих сил в каждой точке приоткосной области определяются выражениями

$$F_{iуд} = \left[\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\alpha_i + \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) + \tau_{xz} \sin 2\alpha_i + \sigma_{св} \right] \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$F_{исд} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\alpha_i + \tau_{xz} \cos 2\alpha_i, \quad (3)$$

где σ_z , σ_x , τ_{xz} и α — соответственно безразмерные (деленные на γH) напряжения и угол наклона площадки сдвига в рассматриваемой точке грунтового массива; $\sigma_{св} = C(\gamma H \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$ — приведенное давление связности (C , φ , γ и H — соответственно удельное сцепление, угол внутреннего трения, удельный вес грунта и высота откоса).

Известно, что перемещения от собственного веса грунта формируются на протяжении всего периода существования грунтового массива и потому истинные их значения не могут быть точно определены методами теории упругости [4]. Поэтому возникает потребность исключить их из рассмотрения и избавиться от необходимости их отыскания в случае исследования устойчивости нагруженных откосов. Использование формулы (1) как раз и обеспечивает выполнение этого требования. Действительно, вычисляем перемещения n точек исследуемой области, лежащих на наиболее вероятной линии скольжения, с учетом внешних нагрузок и собственного веса грунта Δ_i . Затем вычисляем перемещения тех же n точек δ_i , возникающие только от собственного веса грунта без учета внешней нагрузки. Разность этих перемещений, с позиций теории упругости, и будет равна собственно перемещениям только от действия внешней нагрузки. Причем в результате операции вычитания будут уничтожены и погрешности результата, возникающие, например, из-за неадекватности граничных условий, степени дискретизации расчетной области, неправильного выбора ее размеров и т. д.

При всех прочих равных условиях величина коэффициента запаса устойчивости однородного нагруженного откоса зависит от геометрических параметров равномерно распределенной нагрузки: ее ширины b и ширины бермы безопасности d (рис. 1).

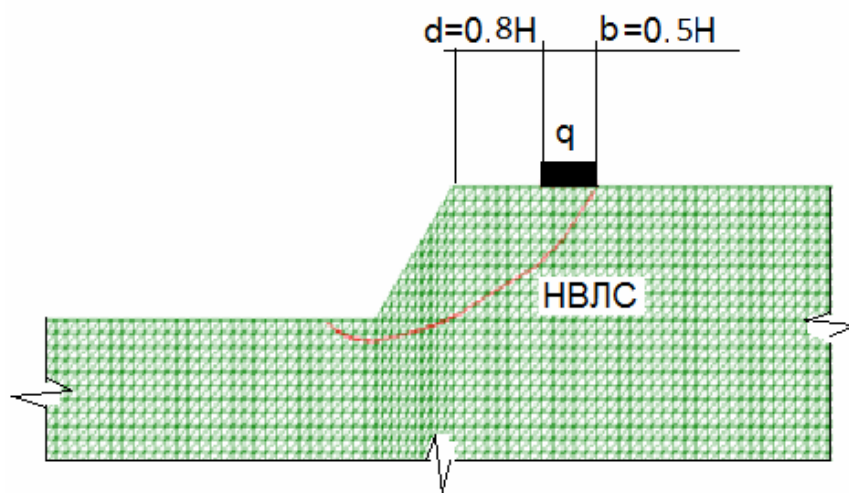


Рис. 1. Фрагмент расчетной конечно-элементной схемы

В работе [5] нами предложен метод расчета устойчивости однородного откоса, находящегося под действием равномерно распределенной нагрузки, основанный на анализе только полей напряжений.

Величина коэффициентов запаса устойчивости в точках грунтового массива вычислялась по формуле

$$K_m = \frac{\left[\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\alpha + \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) + \tau_{xz} \sin 2\alpha + \sigma_{св} \right] \operatorname{tg} \varphi}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\alpha + \tau_{xz} \cos 2\alpha}, \quad (4)$$

а величина глобального коэффициента запаса устойчивости откоса, вычисленная для наиболее вероятной линии скольжения, определялась выражением

$$K = \frac{\int_0^l F_{уд}(S) ds}{\int_0^l F_{сд}(S) ds}, \quad (5)$$

где S — дуговая координата точки на наиболее вероятной линии скольжения.

Было установлено, что величина коэффициента запаса устойчивости может быть определена выражением

$$K = n_1 n_2 (2a\sigma_{св} + c) \operatorname{tg} \varphi, \quad (6)$$

где коэффициенты n_1 , n_2 , a , c определяются по графикам.

Первые два коэффициента корректируют величину K в зависимости от ширины нагрузки и от ее расстояния до бровки откоса, причем их численные значения не зависят от величины интенсивности нагрузки q и угла заложения откоса β . Остальная часть выражения (6) определяет величину коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса при наиболее неблагоприятных, с точки зрения устойчивости, значениях ширины нагрузки b и бермы d .

Аналогичную формулу удалось получить и в случае расчета устойчивости нагруженных откосов на основе анализа распределения напряжений и перемещений в приоткосной области при помощи компьютерной программы [6]. В этой программе для определения полей напряжений и перемещений формализован метод конечных элементов, а для построения наиболее вероятной линии скольжения — метод профессора В. К. Цветкова [7].

В результате обработки результатов расчетов для однородных откосов с углами заложения $\beta = 25^\circ, 40^\circ, 55^\circ$ установлено, что вне зависимости от угла заложения откоса β , его высоты H и интенсивности внешней нагрузки q минимальное значение коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса K^* будет соответствовать условию, что ширина равномерно распределенной нагрузки равна $b = 0,5H$, а расстояние от нагрузки до кромки откоса (ширина бермы безопасности) равно $d = 0,8H$ (см. рис. 1).

При этом величина коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса при любой величине интенсивности равномерно распределенной нагрузки q , любой ее ширине b и при любом ее расстоянии от бровки откоса d может быть вычислена по формуле

$$K = K^* k_1 k_2, \quad (7)$$

где значения K^* , k_1 и k_2 определяются по графикам.

На рис. 2—5 приведены графические зависимости, позволяющие определять численные значения коэффициентов, входящих в формулу (7), при углах заложения откоса $\beta=25^\circ, 40^\circ, 55^\circ$.

Анализ кривых, приведенных на рис. 2—4, показывает, что все они могут быть с погрешностью, не превышающей 5 %, аппроксимированы выражением

$$K^* = a q^{-b}, \quad (8)$$

где a и b — коэффициенты, определяемые по графикам, приведенным на рис. 6, с погрешностью, не превышающей 7 %, причем $[a] = [\text{м}^2/\text{н}]$, а коэффициент b безразмерен.

Рассмотрим примеры, первый из которых говорит о точности аппроксимации полученных в результате расчета кривых, а второй — о степени соответствия получаемых результатов данным натурных наблюдений.

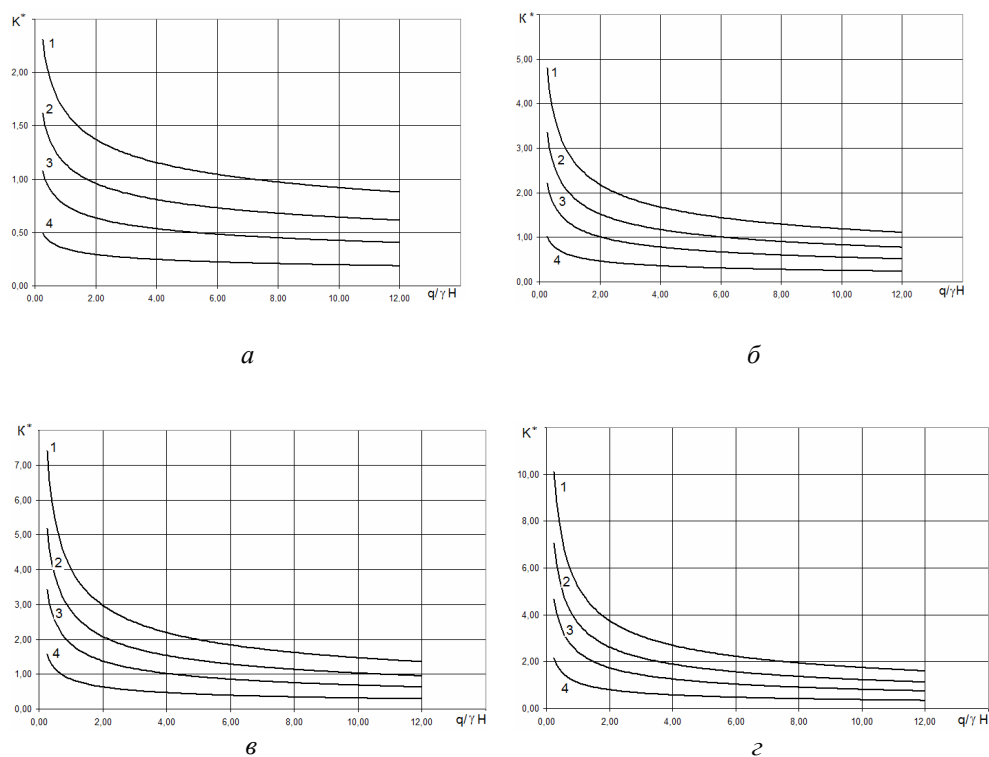


Рис. 2. Графики зависимости вида $K^* = f(q/\gamma H)$ для $\beta = 25^\circ$ при $\sigma_{св} = 0,05$ (а); $\sigma_{св} = 0,583$ (б); $\sigma_{св} = 1,117$ (в); $\sigma_{св} = 1,65$ (г); номера кривых на графиках соответствуют значениям угла внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$ (1); $\varphi = 22^\circ$ (2); $\varphi = 15^\circ$ (3); $\varphi = 7^\circ$ (4)

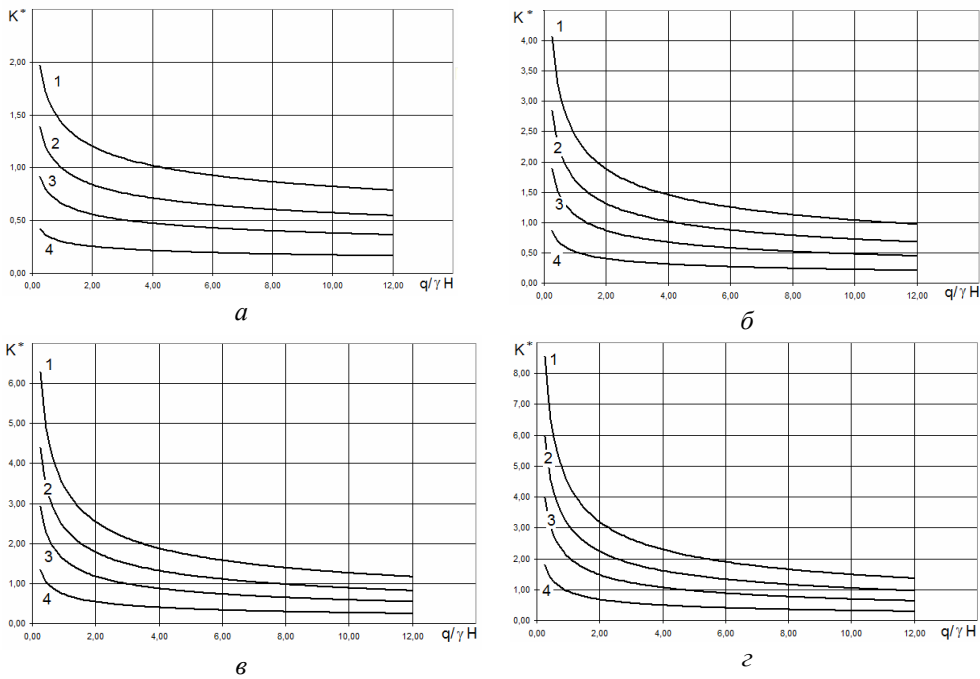


Рис. 3. Графики зависимости вида $K^* = f(q/\gamma H)$ для $\beta = 40^\circ$ при $\sigma_{св} = 0,05$ (*a*); $\sigma_{св} = 0,583$ (*б*); $\sigma_{св} = 1,117$ (*в*); $\sigma_{св} = 1,65$ (*г*); номера кривых на графиках соответствуют значениям угла внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$ (1); $\varphi = 22^\circ$ (2); $\varphi = 15^\circ$ (3); $\varphi = 7^\circ$ (4)

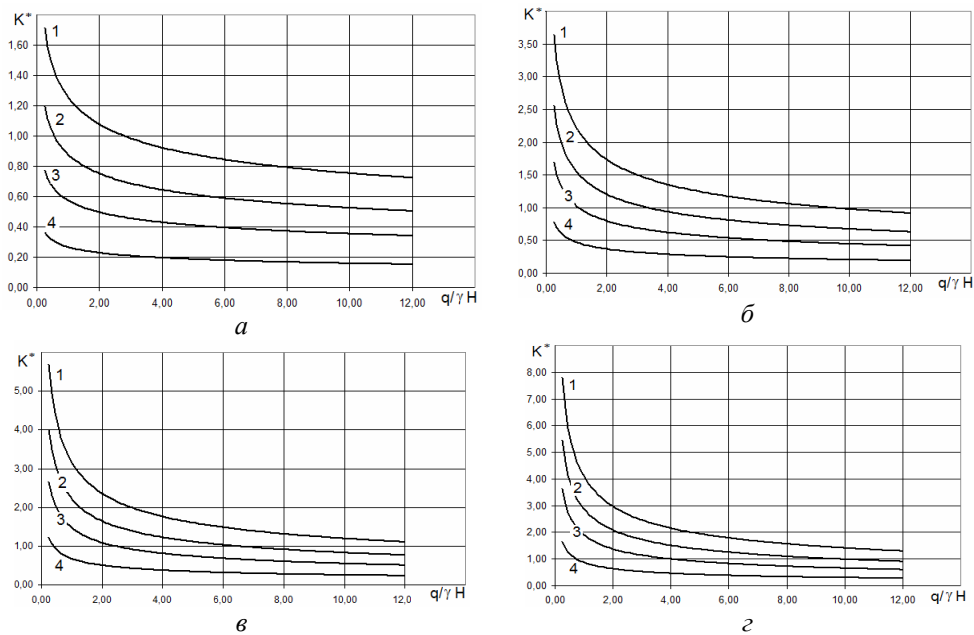


Рис. 4. Графики зависимости вида $K^* = f(q/\gamma H)$ для $\beta = 55^\circ$ при $\sigma_{св} = 0,05$ (*a*); $\sigma_{св} = 0,583$ (*б*); $\sigma_{св} = 1,117$ (*в*); $\sigma_{св} = 1,65$ (*г*); номера кривых на графиках соответствуют значениям угла внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$ (1); $\varphi = 22^\circ$ (2); $\varphi = 15^\circ$ (3); $\varphi = 7^\circ$ (4)

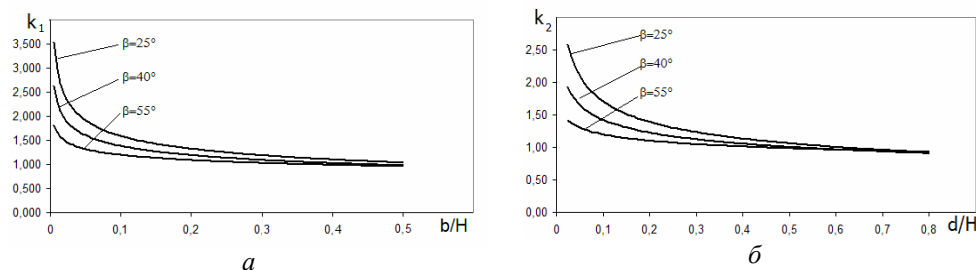


Рис. 5. Графики для определения коэффициентов k_1 (а) и k_2 (б)

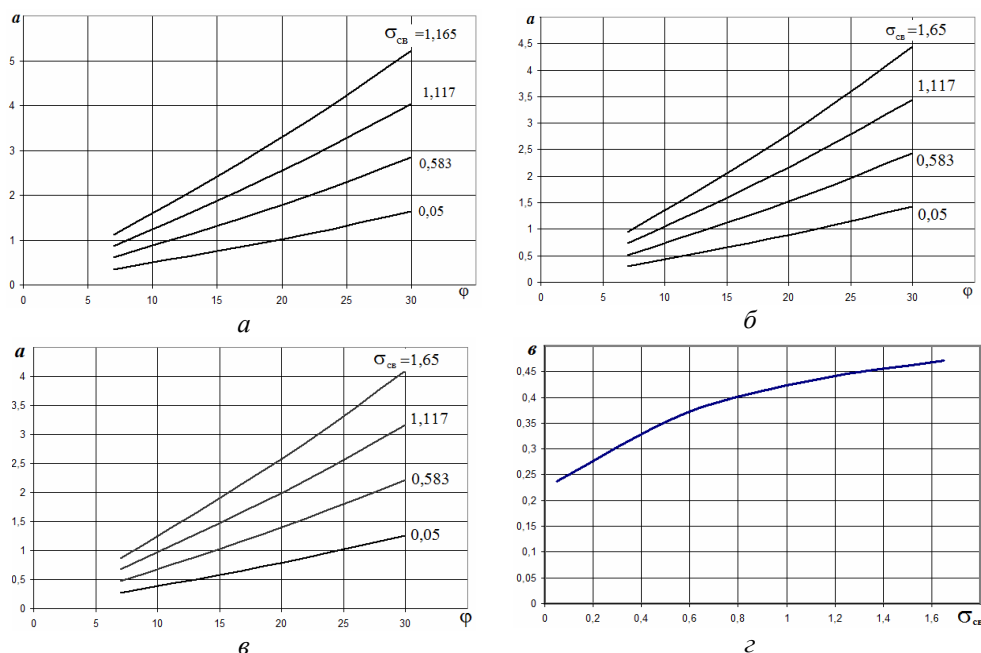


Рис. 6. Графики зависимостей $a = f(\phi)$ при $\beta = 25^\circ$ (а); $\beta = 40^\circ$ (б); $\beta = 55^\circ$ (в) и график зависимости $b = f(\sigma_{св})$ для любых значений β и $\sigma_{св}$ (г)

Пример № 1. Рассмотрим прямолинейный откос высотой $H = 20$ м с углом заложения $\beta = 47^\circ$, сложенный однородным связным грунтом, имеющим объемный вес $\gamma = 2$ т/м³, угол внутреннего трения $\phi = 23^\circ$, удельное сцепление $C = 25$ кПа, коэффициент бокового давления грунта $\xi_0 = 0,75$, что отвечает его среднему значению для глинистых грунтов [8], а модуль деформации $E_0 = 15$ МПа [6]. Откос нагружен внешней равномерно распределенной нагрузкой интенсивности $q_{вн} = 1,35\gamma H$, которая приложена на расстоянии $d = 0,6H = 12$ м от его бровки, ширина нагруженного участка $b = 0,4H = 8$ м.

Расчетная схема МКЭ состоит из 6216 конечных элементов, сопряженных в 12100 узлах, при этом матрица жесткости системы имеет ширину 126.

Использование метода линейной интерполяции, графиков, приведенных на рис. 2—6, и формул (7) и (8) позволило получить численное значение соответствующей величины коэффициента запаса устойчивости, равное $K = 1,16$. Величина коэффициента запаса устойчивости, вычисленная непосредственно

при помощи компьютерной программы [6], оказалась равной $K_{[3]}=1,08$. Таким образом, их отличие составляет 6,9 %, что является допустимой степенью точности при проведении инженерных расчетов.

Пример № 2. В работе [10] описывается случай образования оползня в районе Лейпциг — Зейц (Германия) на карьере Цинзендорф в экскаваторном уступе с углом заложения $\beta = 36^\circ$, который привел к аварии отвального моста. Грунты, слагающие тело оползня, представляли собой ленточные глины с содержанием 42,9...58,5 % ила и 30,6...43,5 % глины с влажностью 25,3 %. Консистенция глин была мягкопластичной, а способность восприятия влаги 57 и 134,4 %. При этом угол внутреннего трения грунта $\varphi = 21^\circ$, удельное сцепление $C = 1,72 \cdot 10^4$ Па, величина коэффициента бокового давления $\xi_o = 0,75$. Интенсивность внешней нагрузки, создаваемой экскаватором, $q = 4,41 \cdot 10^3$ Н/м². Экскаватор находился у вершины откоса, что соответствует ширине бермы безопасности $d = 0$, а ширина его базы (ширина нагрузки) $b = 7$ м.

В результате расчета данного объекта методом К. Терцаги [11], проведенного автором работы [10], величина коэффициента запаса устойчивости определена равной $K_{\text{Тер}} = 1,19$. Использование предложений Н. Н. Потаповой [2] приводит к результату $K_{\text{Пот}} = 0,9$. Расчет по методу В. К. Цветкова [7] позволяет получить значение $K_{\text{Цв}} = 0,87$. Расчет по предлагаемой методике при помощи компьютера приводит к результату $K_{\text{пр}}^k = 0,97$. Использование метода линейной интерполяции, графиков, приведенных на рис. 2—6, и формул (7) и (8) дает расчетное значение величины коэффициента запаса устойчивости, равное $K_{\text{пр}}^{\text{гп}} = 1,009$.

Отметим, что последние два значения отличаются от 1 всего на 3 и 1 %.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложен инженерный метод расчета устойчивости однородных откосов, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой различной ширины и интенсивности при различном ее положении на откосе. Метод включает простые формулы и графики, которые позволяют с достаточной для инженерной практики степенью точности проводить вычисления. Численные значения величин коэффициентов запаса устойчивости, вычисленные непосредственно при помощи ПЭВМ, отличаются от соответствующих значений, определенных при помощи предлагаемых формул и графиков, не более чем на 7 %.

2. Расчеты показали, что численные значения коэффициентов запаса устойчивости разрушившегося [«перешедшего» в предельное состояние ($K = 1$)] нагруженного откоса определены равными $K_{\text{пр}}^k = 0,97$ и $K_{\text{пр}}^{\text{гп}} = 1,009$, т. е. отличаются от единицы на 3 и 1 %, что дает возможность рекомендовать инженерный метод для практического использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолов А. Н. Расчет устойчивости нагруженных откосов на основе использования принципа возможных перемещений / А. Н. Богомолов [и др.] // Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства : материалы Международной конф. Пермь : ПНИПУ, 2011. С. 350—355.
2. Потапова Н. Н. Оценка устойчивости грунтовых откосов и несущей способности оснований сооружений на основе анализа распределения напряжений и перемещений : автореф. дисс... канд. техн. наук. Волгоград : ВолгГАСА, 2001. 205 с.
3. СНиП 33-01—2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. М. : Госстрой России, 2004.

4. *Тер-Мартirosян З. Г.* Механика грунтов. М. : АСВ, 2009. 551 с.
5. *Богомолов А. Н., Верецагин В. П.* Моделирование разрушения нагруженных откосов // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала : межвуз. сб. науч. тр. Пермь : ППИ, 1990. С. 112—114.
6. *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.
7. *Цветков В. К.* Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград : Нижневолжское книжное изд-во, 1979. 235 с.
8. *Вялов С. С.* Реологические основы механики грунтов. М. : Высш. шк., 1978. 447 с.
9. *Каган А. А.* Расчетные характеристики грунтов. М. : Стройиздат, 1985. 243 с.
10. *Мочак Г.* Оползни в результате имеющихся поверхностей скольжения и контактов слоев в ледниковых отложениях // Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними. Киев, 1964. С. 53—57.
11. *Terzaghi K., Peck R.* Cholanreza mesri. Soil mechanics in engineering practice. Third Edition, 1995. 549 p.
1. *Bogomolov A. N.* Raschet ustoychivosti nagruzhennykh otkosov na osnove ispolzovaniya printsipa vozmozhnykh peremeshcheni / A. N. Bogomolov [i dr.] // Fundamenty glubokogo zalozeniya i problemy osvoeniya podzemnogo prostranstva : materialy Mezhdunarodnoy konf. Perm : PNIPU, 2011. S. 350—355.
2. *Potapova N. N.* Otsenka ustoichivosti gruntovykh otkosov i nesushchei sposobnosti osnovani sooruzheni na osnove analiza raspredeleniya napryazheni i peremeshcheni: diss... kand. tekhn. nauk. Volgograd : VolgGASA, 2001. 205 s.
3. SNiP 33-01—2003. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovniye polozenia. M. : Gosstroi Rossii, 2004.
4. *Ter-Martirosyan Z. G.* Mekhanika gruntov. M. : ASV, 2009. 551 s.
5. *Bogomolov A. N., Vereshchagin V. P.* Modelirovanie razrusheniya nagruzhennykh otkosov // Osnovaniya i fundamenty v geologicheskikh usloviyah Urala : mezhvuz. sb. nauch. tr. Perm : PPI, 1990. S. 112—114.
6. *Bogomolov A. N.* Ustoichivost (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie) / A. N. Bogomolov [i dr.]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2009613499 ot 30 iyunya 2009 g.
7. *Tsvetkov V. K.* Raschet ustoichivosti otkosov i sklonov. Volgograd : Nizhnevolzhskoe knizhnoe izd-vo, 1979. 235 s.
8. *Vyalov S. S.* Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov. M. : Vysh. shk., 1978. 447 s.
9. *Kagan A. A.* Raschetnye kharakteristiki gruntov. M. : Stroyizdat, 1985. 243 s.
10. *Mochak G.* Opolzni v rezultate imeyushchihsya poverhnostei skolzheniya i kontaktov sloev v lednikovyyh otlozheniyakh // Materialy soveshchaniya po voprosam izucheniya opolznei i mer borby s nimi. Kiev, 1964. S. 53—57.
11. *Terzaghi K., Peck R.* Cholanreza mesri. Soil mechanics in engineering practice. Third Edition, 1995. 549 p.

© Богомолова О. А., Ечевский А. В., Бабаханов Б. С., Шиян С. И., 2012

Поступила в редакцию
в январе 2012 г.

Ссылка для цитирования:

Инженерный метод расчета устойчивости нагруженных откосов / О. А. Богомолова, А. В. Ечевский, Б. С. Бабаханов, С. И. Шиян // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 1(20).