

УДК 624.131

О. А. Богомолова^а, А. В. Жиделев^б, С. А. Богомолов^в

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *Филиал «Взлет» Московского авиационного института (МАИ) в г. Ахтубинске*

^в *Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева*

МЕТОД ВИРТУАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАГРУЖЕННЫХ ОТКОСОВ

На протяжении многих лет расчет устойчивости однородных откосов проводится на основе методов, в основу которых положена гипотеза о круглоцилиндрической форме поверхности (линии) скольжения, выдвинутая К. Петтерсоном в 1916 г. Во второй трети прошлого столетия развитие получили методы расчета, основанные на анализе напряженно-деформированного состояния приоткосной области, в том числе и методы, использующие принцип возможных перемещений (принцип Лагранжа). До недавнего времени при использовании принципа Лагранжа перемещения точек, лежащих на наиболее вероятной линии скольжения, определялись как сумма перемещений от собственного веса грунта и внешней нагрузки. Такой подход нам представляется не совсем правильным, так как перемещения от собственного веса грунта формируются на протяжении всего периода существования грунтового массива и потому истинные их значения не могут быть достоверно определены методами теории упругости. Кроме того, эти перемещения уже были реализованы еще до приложения нагрузки от возводимого сооружения. На основании это разработан алгоритм решения задачи, который формализован в компьютерной программе, разработанной авторами с коллегами. В работе приведены доведенные до числа примеры расчета устойчивости нагруженных откосов, дано сравнение полученных результатов с результатами, полученными при использовании других подходов. Установлено, что для нагруженных откосов, рассмотренных в настоящей работе, использование предложений авторов снижает величину коэффициента запаса устойчивости примерно на 10 %. При других параметрах исследуемого объекта разница может быть существенно больше.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нагруженный однородный грунтовой откос, коэффициент запаса устойчивости в точке, глобальный коэффициент запаса устойчивости, метод возможных перемещений, физико-механические свойства грунта, коэффициент бокового давления, базовая эпюра.

Введение

На протяжении многих лет расчет устойчивости однородных откосов проводится на основе методов, в основу которых положена гипотеза о круглоцилиндрической форме поверхности (линии) скольжения, выдвинутая К. Петтерсоном в 1916 г. [1, 2]. Эти методы постоянно модернизируются, но это не избавляет их от ряда существенных недостатков, одним из которых является то, что при расчете учитывается (и лишь приблизительно) только одна вертикальная составляющая напряжения, действующего в точке приоткосной области, т. е. расчет проводится без учета напряженного состояния грунтового массива.

Известны методы расчета устойчивости откосов, основанные на анализе напряженного состояния грунтового массива [3, 4], причем напряжения в приоткосной области могут быть определены на основе аналитических решений краевых задач теории упругости методами теории функций комплексного переменного [3, 4] или численными методами, например МКЭ.

Используя условие пластичности Кулона [5, 6] в виде, предложенном Како [7], можно получить выражение для вычисления величины коэффициента запаса устойчивости в любой точке грунтовой толщи:

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

где σ_z , σ_x , τ_{xz} — безразмерные (в долях γH) компоненты напряжения, действующие в рассматриваемой точке; $\sigma_{cb} = c(\gamma H \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$ — приведенное давление связности; C , φ , γ и H — сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта и высота откоса соответственно; α — угол наклона касательной к наиболее вероятной линии скольжения в данной точке (угол ориентации наиболее вероятной площадки сдвига).

Угол наклона площадки сдвига, при котором значение K принимает минимальное значение, определяется из условий (2) по формуле (3) [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \alpha} &= 0; \\ \frac{\partial^2 K}{\partial \alpha^2} &> 0, \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\sin 2\alpha_{1;2} = -\frac{2\tau_{xz}}{B} \pm (\sigma_z - \sigma_x) \sqrt{\frac{B^2 - D}{B^2 D}}, \quad (3)$$

где $B = (\sigma_z + \sigma_x + 2\sigma_{cb})$; $D = 4\tau_{xz}^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2$.

Отметим, что в работе [4] предложены еще два способа определения угла ориентации наиболее вероятной площадки сдвига.

Глобальный коэффициент устойчивости откоса по наиболее вероятной линии скольжения (НВЛС) определяется по формуле

$$K = \frac{\int_0^l F_{уд}(S) ds}{\int_0^l F_{сд}(S) ds}, \quad (4)$$

где $F_{уд}$ и $F_{сд}$ — удерживающие и сдвигающие силы в точках НВЛС, определяемые числителем и знаменателем формулы (1) соответственно; S — дуговая координата точки НВЛС.

Методики построения наиболее вероятных линий скольжения подробно изложены в работах [3, 4]. Необходимо отметить, что в их основу положены предложения, сделанные в работе [8]. Эти методики позволяют сразу, без проведения дополнительных расчетов и построений, отыскать такую линию скольжения, которая заведомо будет обладать минимальным значением величины коэффициента запаса устойчивости при условии, что его вычисление будет выполняться по формулам (1)—(4).

Тем не менее многие исследователи продолжают изыскания с целью совершенствования расчетных методов.

I. Расчет устойчивости откосов на основе метода виртуальных перемещений

Еще во второй половине прошлого столетия многие ученые обращались к методу виртуальных перемещений с целью построения на его основе метода расчета устойчивости откосов.

Принцип возможных перемещений (принцип Лагранжа) [8] — один из основных принципов механики, выражающий общее условие равновесия механической системы. Он широко используется при статических исследованиях материальных систем, при этом действие наложенных на систему связей учитывается введением соответствующих реакций.

Именно этот принцип был положен в основу методов расчета устойчивости откосов [9—12], однако здесь перемещения точек, лежащих на наиболее вероятной поверхности скольжения, не назначаются на основе анализа напряженного состояния приоткосной области, а произвольно варьируются по величине и направлению до достижения условия $K = K_{\min}$. Понятно, что при таком подходе количество «решений» задачи может быть бесконечно большим: можно построить сколько угодно линий скольжения, назначая величины перемещений различных ее точек так, чтобы значения глобального коэффициента запаса K были одинаковыми. И какими эти коэффициенты запаса должны быть? Ведь можно построить такую линию скольжения, что величина K получится меньше той, что есть в действительности.

Кроме того, разработчиками этих методов сделаны не вполне корректные допущения:

- призма скольжения разбивается на отдельные блоки, силы взаимодействия и трения между которыми редко учитываются; ориентация этих сил и положение точек их приложения ничем не обосновываются, а назначаются произвольно, чтобы сделать статически неопределимую задачу о равновесии блоков статически определимой;
- форма и положение поверхности разрушения принимаются заранее известными; в процессе решения задачи не устанавливается их непосредственная связь с физико-механическими свойствами грунтов, геометрией откоса, поверхностными нагрузками;
- практически всегда учитывается лишь одна (и то приближенно в виде веса отсека) вертикальная σ_z составляющая напряжений в точках приоткосной зоны;
- рассматривается полубесконечный откос (не учитывается факт концентрации напряжений в области перехода откоса в подошву); известные методы расчета не позволяют учесть взаимное влияние откосов насыпей и выемок на их устойчивость, так как в расчетной схеме основание откоса не учитывается, а дневная поверхность откоса бесконечна, и т. д.;
- в расчетах устойчивости не учитывается такая важная величина, как коэффициент бокового давления грунта ξ_0 . Все это делает необходимым поиск новых решений задачи об устойчивости откосов с использованием метода виртуальных перемещений, которые основывались бы на анализе напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

В работе Н. Н. Потаповой предложен метод расчета устойчивости нагруженных откосов, в котором построение наиболее вероятной линии

скольжения проводится согласно методикам [3, 4], а величина коэффициента запаса устойчивости в точке грунтового массива определяется как отношение работ соответствующих удерживающих и сдвигающих сил*. Величина глобального коэффициента запаса устойчивости K вычисляется по формуле, аналогичной формуле (1), как отношение алгебраических сумм работ удерживающих и сдвигающих сил, действующих в точках наиболее вероятной линии скольжения:

$$K = \frac{\sum A_{i\text{уд}}}{\sum A_{i\text{сд}}} = \frac{\sum (F_{i\text{уд}} \delta_i \cos \alpha_{i\text{уд}})}{\sum (F_{i\text{сд}} \delta_i \cos \alpha_{i\text{сд}})}, \quad (5)$$

где $F_{i\text{уд}}$, $F_{i\text{сд}}$ — удерживающие и сдвигающие силы соответственно, определяемые числителем и знаменателем формулы (1) соответственно; δ_i и $\alpha_{i\text{уд}}$, $\alpha_{i\text{сд}}$ — полное перемещение и углы между положительными направлениями удерживающей и сдвигающей силы и направлением вектора полного перемещения в i -й точке поверхности (линии) скольжения соответственно.

Считаем, что выражение (5) не вполне корректно, так как здесь в расчет принимаются полные перемещения точек, складывающиеся из перемещений от внешней нагрузки и собственного веса грунта. Природные перемещения от собственного веса грунта формируются на протяжении всего периода существования грунтового массива и потому истинные их значения не могут быть достоверно определены методами теории упругости, что, несомненно, сказывается на достоверности получаемого результата. Игнорирование этого обстоятельства может привести к получению при расчете завышенных или, напротив, заниженных коэффициентов запаса, что может негативно сказаться на проектных решениях, и, как следствие, может быть не обеспечена безаварийная эксплуатация грунтового сооружения.

Но и на этом проблемы не заканчиваются. Рассмотрим пример. На рис. 1 изображен однородный откос с углом $\beta = 45^\circ$, сложенный глинистым грунтом. Высота откоса и значения физико-механических свойств слагающего грунта таковы, что при $\varphi = 25^\circ$ величина приведенного давления связности $\sigma_{\text{св}} = 0,3$. Величина коэффициента бокового давления при проведении расчетов принята равной $\xi_0 = 0,75$, что является средним значением для глинистых грунтов [13].

Численные значения напряжений, построение наиболее вероятной линии скольжения и вычисление величины коэффициента запаса устойчивости выполнены при помощи компьютерной программы FEA [14], в которой в том числе формализован и подход, предложенный в работе [11].

На рис. 1, *а* изображена наиболее вероятная линия скольжения и площадки сдвига, построенные на основании метода, предложенного в работе [4], а на рис. 1, *б* — кулоновские области пластических деформаций. Из последнего рисунка видно, что НВЛС прорезает пластическую область, причем размер этой ОПД очень большой, что гарантирует разрушение

* *Потанова Н. Н.* Оценка устойчивости грунтовых откосов и несущей способности оснований сооружений на основе анализа распределения напряжений и перемещений : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2001. 205 с.

возводимого на откосе сооружения и самого откоса. При этом численные значения коэффициентов запаса устойчивости, вычисленных при помощи формул (1)—(4) и методики [12], равны $K_1 = 1,4356$ и $K_2 = 1,3522$ соответственно ($K_2 < K_1$ на 6,5 %), что, казалось бы, должно обеспечивать устойчивость объекта. Налицо противоречие. Что же делать в такой ситуации?

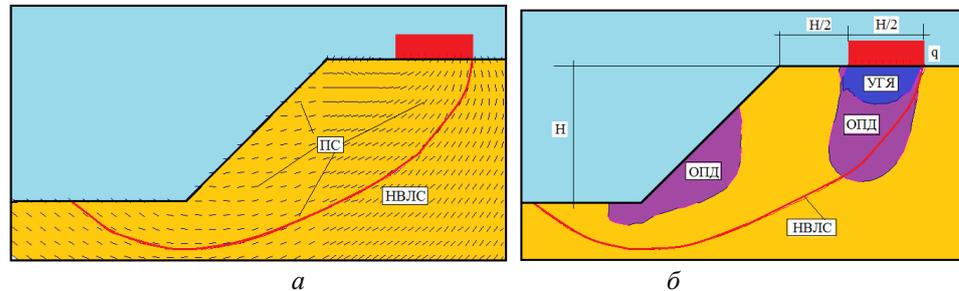


Рис. 1. Наиболее вероятная линия скольжения и площадки сдвига (а) и кулоновские области пластических деформаций (б) в теле однородного откоса

II. Предложения для решения задачи

При проектировании грунтовых откосов необходимо контролировать напряженное состояние грунтового массива и наличие в его теле пластических областей. Определить наличие ОПД можно двумя способами: использовать условие пластичности Кулона или решить соответствующие упругопластические (в том числе и смешанные) задачи. Первый способ общеизвестен, а второй применяется для таких целей еще достаточно редко. В настоящей работе мы рассмотрим первый вариант.

На рис. 2 изображен однородный откос, имеющий прежние геометрические параметры, но физико-механические свойства слагающего грунта таковы, что при $\varphi = 29^\circ$ величина приведенного давления связности равна $\sigma_{св} = 0,33$, коэффициент бокового давления грунта $\xi_0 = 0,55$. Ориентация площадок скольжения (рис. 2, а, в) дает основания предположить, что разрушение откоса может происходить по двум сценариям: образование оползня, влекущее за собой сползание призмы скольжения вместе с возводимым сооружением вниз влево и опрокидывание возводимого сооружения, обусловленное выпором грунта из-под фундамента вверх вправо. Как видно из рис. 2, б, г, области пластических деформаций малы. Левая ОПД может спровоцировать лишь небольшой локальный вывал грунта, который не окажет влияния на устойчивость всего откоса. Наличие правой пластической области может вызвать ненормативные осадки возводимого сооружения, но на величину коэффициента запаса устойчивости основания не повлияет, т. е. линия выпора грунта EF ее не пересекает.

Рассматривая наиболее вероятную линию скольжения $ABCD$, видим, что она пересекает пластическую область по линии BC . Ведь в точках пластической области численные значения напряжений отличаются от соответствующих значений, найденных на основе решения задач теории упругости. И если говорить строго, то и вокруг пластической области происходит перераспределение напряжений. Как в этом случае вычислять величину коэффициента устойчивости?

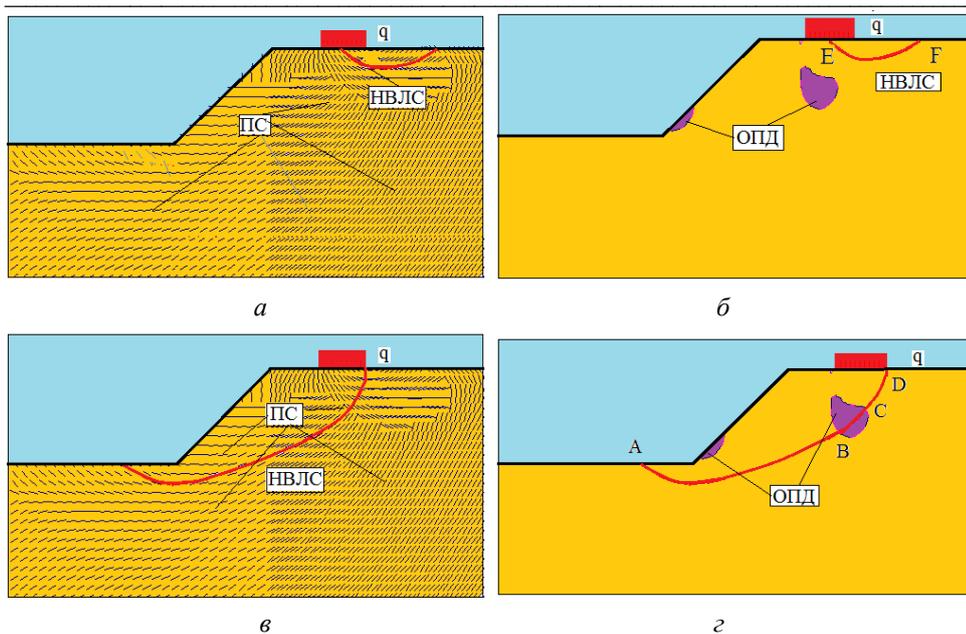


Рис. 2. Площадки сдвига, наиболее вероятные линии скольжения и области пластических деформаций в исследуемом однородном грунтовом откосе

Нами предлагается следующая последовательность вычисления величины коэффициента запаса устойчивости:

1. Составляется расчетная схема метода конечных элементов, к которой предъявляются требования: сетка КЭ должна быть максимально однородной, содержать максимальное количество элементов при условии минимальности ширины матрицы жесткости системы; размеры конечно-элементной схемы должны быть такими, чтобы максимально исключить влияние граничных условий на результат вычисления.

2. Вычисляются напряжения, и проводится контроль наличия или отсутствия областей пластических деформаций.

3. Если ОПД отсутствуют или их размеры малы, то проводится построение наиболее вероятной линии скольжения на основании методик, изложенных в работах [3, 4].

4. На НВЛС выбирается n -е количество точек так, чтобы горизонтальные координаты каждой следующей точки были на $0,05H$ больше, чем предыдущей (такой шаг построения определен как оптимальный на основе анализа результатов многочисленных вычислений), и вычисляют во всех этих точках величины удерживающих и сдвигающих сил, которые определяются числителем и знаменателем формулы (1) соответственно, и перемещения от собственного веса грунта и от совместного веса грунта плюс нагрузка от сооружения.

5. Формула (5) переписывается в виде (6), после чего вдоль НВЛС строят эпюры работ удерживающих — числитель формулы (6) — и сдвигающих — знаменатель формулы (6) — сил, отношение площадей которых определяет величину коэффициента запаса устойчивости откоса:

$$K = \frac{\sum A_{i \text{ уд}}}{\sum A_{i \text{ сд}}} = \frac{\sum (F_{i \text{ уд}} (\Delta_i - \delta_i) \cos \alpha_{i \text{ уд}})}{\sum (F_{i \text{ сд}} (\Delta_i - \delta_i) \cos \alpha_{i \text{ сд}})}, \quad (6)$$

где δ_i и Δ_i — соответственно полное перемещение i -й точки наиболее вероятной линии скольжения, вычисленное от действия собственного веса грунта и от совместного действия собственного веса грунта и нагрузки от сооружения.

Если размеры пластических областей таковы, что их необходимо учесть (см. рис. 2, *з*) при вычислении величины коэффициента запаса устойчивости (необходимость учета этого фактора отражена также в работе [15]), то выполняются первые четыре пункта, тогда как при построении эпюр работ удерживающих и сдвигающих сил следует поступать следующим образом. Эпюры удерживающих и сдвигающих сил будут состоять из трех частей каждая, которые строятся на участках наиболее вероятной линии скольжения AB , BC и CD . Участки AB и CD находятся вне области пластических деформаций, а участок BC прорезает ее. Поэтому на участках AB и CD эпюры будут строиться так, как написано в п. 5.

Известно, что в пластической области все площадки скольжения равноправны, так как величина коэффициента запаса устойчивости в любой точке, находящейся внутри ОПД, по любой проходящей через эту точку площадке равна $K_{\text{пл}}^T = 1$, так как удерживающие и сдвигающие силы одинаковы. Поэтому по любому отрезку кривой, в том числе BC , находящемуся внутри пластической области, коэффициент запаса также равен 1. В связи с этим считаем, что участок BC при прорезании пластической области не меняет своей формы и положения, хотя строится по «упругим» напряжениям. Необходимо принять одно допущение, касающееся величин удерживающих и сдвигающих сил на участке BC . Так как мы не решаем «смешанную» задачу, а работаем с упругими напряжениями, значения удерживающих и сдвигающих сил во всех точках отрезка BC будут разными. Поэтому для участка BC предлагается следующий прием: на этом участке строятся эпюры работ удерживающих и сдвигающих сил по упругим напряжениям. Определяются их площади и сравниваются по величине. Эпюра, площадь которой меньше (это идет в запас устойчивости), принимается за базовую, другими словами, эта эпюра одновременно является и эпюрой работ и удерживающих, и сдвигающих сил в пластической области. Она встраивается между «правильными» эпюрами (рис. 3, *а*).

Тогда величина коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса может быть вычислена с учетом формул (1)—(3) и (6) следующим образом:

$$K = \frac{S_{AB}^{\text{уд}} + S_{BC}^{\text{баз}} + S_{CD}^{\text{уд}}}{S_{AB}^{\text{сдв}} + S_{BC}^{\text{баз}} + S_{CD}^{\text{сдв}}}, \quad (7)$$

где $S_{AB}^{\text{уд}}$, $S_{CD}^{\text{уд}}$, $S_{AB}^{\text{сдв}}$, $S_{CD}^{\text{сдв}}$, $S_{BC}^{\text{сдв}}$ — площади эпюр работ удерживающих и сдвигающих сил на участках НВЛС AB и CD соответственно; $S_{BC}^{\text{баз}}$ — площадь базовой эпюры работ.

Результаты этих вычислений для грунтового откоса, изображенного на рис. 2, приведены на рис. 3.

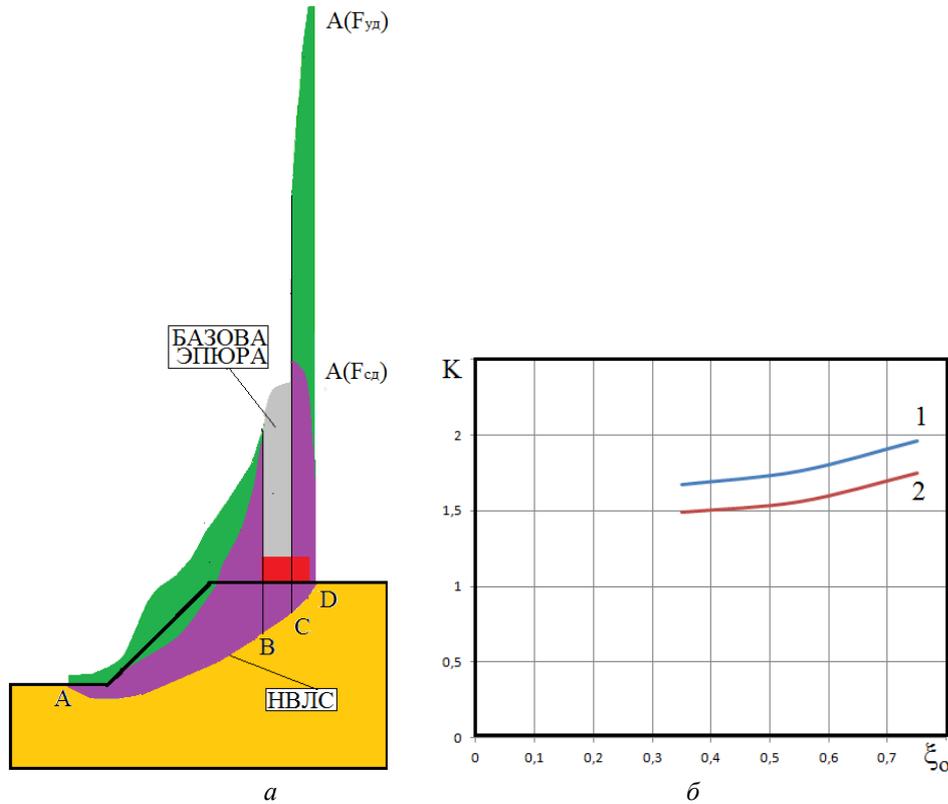


Рис. 3. Результат построения эпюр работ удерживающих и сдвигающих сил (а), графические зависимости вида $K = f(\xi_0)$ (б), полученные на основании методов [3, 4] с использованием формул (1)—(3) — линия 1 и на основе наших предложений и формул (1)—(3), (6), (7) — линия 2

На рис. 3, а изображены эпюры работ удерживающих и сдвигающих сил, а на рис. 3, б — графические зависимости величины коэффициента запаса устойчивости откоса K от численного значения коэффициента бокового давления ξ_0 для результатов, полученных на основании методов [3, 4] с использованием формул (1)—(3) — линия 1 и на основе наших предложений и формул (1)—(3), (6), (7) — линия 2. Отметим, что численные значения коэффициентов запаса устойчивости в первом случае равны $K_{0,35} = 1,67$; $K_{0,55} = 1,76$; $K_{0,75} = 1,96$, а во втором — $K_{0,35} = 1,49$; $K_{0,55} = 1,56$; $K_{0,75} = 1,75$, т. е. численные значения коэффициентов запаса устойчивости, вычисленные без учета образования пластических областей, примерно на 10 % больше соответствующих коэффициентов в случае, когда ОПД учитываются. Отметим, что увеличение коэффициента бокового давления грунта от 0,35 до 0,75 влечет за собой рост значений K в первом случае на 15 %, а во втором — на 17 %. Обе графические зависимости вида $K = f(\xi_0)$, приведенные на рис. 3, б, с точностью в 100 % аппроксимируются полиномом второй степени.

Отметим также, что все вычисления выполнены при помощи компьютерной программы [14], в которой формализованы все упомянутые выше процедуры.

Выводы

При определении кратковременной и длительной устойчивости откосов следует учитывать особенности напряженно-деформированного состояния грунтового массива, в частности процесс образования областей пластических деформаций. Нами показано, что в рассмотренных примерах учет этого фактора снижает величину коэффициента запаса устойчивости примерно на 10 %. На практике бывают случаи, когда эти 10 % могут оказаться критичными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Petterson K. E.* Kajraseti Goteborg des 5-te mars // *Tekniske Tidskrift*. 1916. Vol. 46.
2. *Petterson K. E.* The early history of circular sliding surface // *Geotechnique*. 1955. No. 5.
3. *Цветков В. К.* Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград : Ниж.-Волж. кн. изд-во, 1979.
4. *Богомолов А. Н.* Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ПГТУ, 1996. 150 с.
5. *Coulomb C. A.* Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture // *Memories de savants strangers de L'Academlie des sciences de Paris*. Paris, 1773. 233 p.
6. *Coulomb C. A.* Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture // *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.* 1776. Vol. 7. Pp. 343—387.
7. *Sagout G.* Eguilibre des massifs a frottement interne. Paris, 1934.
8. *Никитин С. Н.* Построение ожидаемой поверхности скольжения по напряжения в бортах карьеров // *Уголь*. 1962. № 1. С. 36—38.
9. *Гольдштейн М. Н.* О применении вариационного исчисления к исследованию устойчивости оснований и откосов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1969. № 1. С. 2—6.
10. *Магдеев У. Х.* Исследование устойчивости откосов вариационным методом в условиях пространственной задачи // *Вопросы геотехники : сб. тр. ДИИТ. Днепропетровск*, 1972. С. 120—129.
11. *Дорфман А. Г.* Точное аналитическое решение новых задач теории устойчивости откосов // *Вопросы геотехники : межвуз. сб. науч. тр. ДИИТ. Днепропетровск*, 1977. С. 53—57.
12. *Korasy J.* Distribution des contraintes a la rupture, forme de la surface de glissement et hauteur theorique des talus // *Comp rend. V Congr. Internat. Mecan sols et trav. Fondat, Paris*, 1961. Vol. II.
13. *Вялов С. С.* Реологические основы механики грунтов. М. : ВШ, 1978. 447 с.
14. FEA : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015617889 от 23 июля 2015 г. / А. Н. Богомолов и др.
15. *Skempton A. W.* Long-term stability of clay slopes // *Geotechnique*. 1964. Vol. 14. No. 2. Pp. 77—101.

© Богомолова О. А., Жиделев А. В., Богомолов С. А., 2022

Поступила в редакцию
в сентябре 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Богомолова О. А., Жиделев А. В., Богомолов С. А. Метод виртуальных перемещений при оценке устойчивости нагруженных откосов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2022. Вып. 4(89). С. 22—31.

Об авторах:

Богомолова Оксана Александровна — канд. техн. наук, доц. каф. математики и информационных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; banzaritcy@mail.ru

Жиделев Андрей Викторович — канд. техн. наук, доц., директор филиала «Взлет» Московского авиационного института (МАИ) в г. Ахтубинске. Российская Федерация, 416501, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5; red_scorpion@list.ru

Богомолов Сергей Александрович — канд. техн. наук, старший преподаватель каф. сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости, РГАУ — МСХА им. К. А. Тимирязева. Российская Федерация, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; bsargau@mail.ru

Oksana A. Bogomolova^a, Andrey V. Zhidelev^b, Sergey A. Bogomolov^c

^a *Volgograd State Technical University*

^b *Branch of Moscow Aviation Institute (National Research University) "Vzlet"*

^c *Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy*

THE METHOD OF VIRTUAL DISPLACEMENTS IN ASSESSING THE STABILITY OF LOADED SLOPES

For many years, the stability of homogeneous slopes has been calculated on the basis of methods based on the hypothesis of the circular cylindrical shape of the sliding surface (line), put forward by K. Petterson in 1916. In the second third of the last century, calculation methods based on the analysis of the stress-strain state of the slope region were developed, including methods using the principle of possible displacements (the Lagrange principle). Until recently, when using the Lagrange principle, the movements of points lying on the most unlikely slip line were defined as the sum of the deviations from the ground's own weight and external load. This approach does not seem to us to be quite correct, since displacements from the ground's own weight are formed throughout the entire period of the existence of the soil massif and therefore their true values cannot be reliably determined by the methods of elasticity theory. In addition, these movements have already been implemented even before the application of the load from the structure under construction. Based on this proposal, an algorithm for solving the problem has been developed, which is formalized in a computer program developed by the authors and colleagues. The paper presents examples, brought to a number, of calculating the stability of loaded slopes, and compares the results obtained with the results obtained using other approaches. It is established that for the loaded slopes considered in this paper, the use of the authors' proposals reduces the value of the stability margin coefficient by about 10 %. With other parameters of the object under study, the difference may be significantly greater.

Key words: loaded homogeneous soil slope, coefficient of stability margin at a point, global coefficient of stability margin, method of possible displacements, physical and mechanical properties of soil, lateral pressure coefficient, basic plot.

For citation:

Bogomolova O. A., Zhidelev A. V., Bogomolov S. A. [The method of virtual displacements in assessing the stability of loaded slopes]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2022, iss. 4, pp. 22—31.

About authors:

Oksana A. Bogomolova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; banzaritcyn@mail.ru

Andrey V. Zhidelev — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Branch of Moscow Aviation Institute (National Research University) "Vzlet". 5, Dobrolyubova st., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation; red_scorpion@list.ru

Sergey A. Bogomolov — Candidate of Engineering Sciences, Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 49, Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; bsargau@mail.ru