

УДК 624.131:624.046.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ОПАСНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ МЕТОДОМ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. А.П. КРЕМНЕВ,
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, Н.Н. ВИШНЯКОВ
(Полоцкий государственный университет)

Исследуется проблема определения наиболее опасной поверхности скольжения при расчете устойчивости откоса методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Рассмотрены известные рекомендации по поиску центров наиболее опасных поверхностей скольжения различных авторов. Предложена реализация алгоритма расчета устойчивости откосов на ЭВМ с использованием объектно-ассоциативной системы, разработанной в Полоцком государственном университете. С помощью данной программы выполнен анализ расположения наиболее опасных поверхностей скольжения для откосов различного геологического строения. Сделаны выводы о применении предложенных ранее рекомендаций по поиску центров наиболее опасных поверхностей скольжения.

Задача по определению устойчивости массива грунта в откосах достаточно часто возникает при проектировании и строительстве различного рода объектов в районах с пересеченной местностью. Наиболее характерной в этом отношении является территория города Витебска, изрезанная глубокими оврагами ручьев Дунай, Гапеев, Витьба, а также береговая зона реки Западная Двина. Образование оползней (рис. 1) в данных районах достаточно распространенное явление.



Рис. 1. Образование оползня в районе стадиона Витебского государственного университета

Проблема обеспечения устойчивости естественных откосов становится наиболее актуальной в связи с масштабной реконструкцией центра Витебска. Вблизи бровок откосов и на склонах оврагов ведется проектирование и строительство культурно-развлекательных сооружений (променадов, прогулочных лестниц, аттракционов, беседок и т.д.) и жилых домов. При этом зачастую изменяется геометрия откоса, подрезается основание, нарушается растительный слой, изменяются гидрологические условия, появляются дополнительные нагрузки. В результате могут образовываться оползни, не приводящие к катастрофическим последствиям.

Задача по определению устойчивости откосов, выявлению причин образования оползней, влияния на устойчивость техногенной деятельности человека имеет большое практическое значение.

Наиболее распространенным методом расчета устойчивости откоса является *метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения (метод шведского геотехнического общества)*. Данный метод позволяет оценить устойчивость откоса любого очертания, учитывает неоднородное сложение, влияние фильтрационных сил, дополнительные нагрузки от зданий и сооружений, расположенных вблизи бровки склона или непосредственно на склоне [1].

Коэффициент устойчивости откоса представляет собой отношение суммы моментов удерживающих сил к сумме моментов сдвигающих:

$$\eta = \frac{M_{уд}}{M_{сд}}$$

При этом согласно действующим нормам проектирования [2] откос считается устойчивым, если $\eta > 1,1 \dots 1,15$.

Наибольшую сложность в данном методе вызывает поиск наиболее опасной поверхности скольжения, для которой коэффициент запаса минимальный.

Существует несколько методов определения положения центра наиболее опасной поверхности скольжения [3]:

- способ последовательного приближения, который имеет различия лишь в назначении первоначальной области нахождения центра наиболее опасной поверхности скольжения;
- определение центра критической кривой скольжения с помощью графика Ямбу;
- способ площадей;
- расчет по вспомогательным таблицам;
- расчет по графику Д. Тейлора.

Последние два способа применяются в основном для расчета склонов, сложенных однородными грунтами.

При неоднородном сложении грунтов наибольшее применение нашел **метод последовательных приближений**, который и сегодня является самым распространенным. Различие подходов в данном способе связано с первоначальным заданием области нахождения центра наиболее опасной поверхности скольжения. Ограничение области поиска значительно сокращает количество вычислений. Необходимо отметить, что под неоднородностью в данной работе подразумевается слоистое залегание грунтов осадочного происхождения, прочностные свойства которых существенно не отличаются. При выраженной неоднородности (наличие скальных, полускальных пород) и при существенном различии прочностных свойств грунтов (в разы) метод круглоцилиндрических поверхностей применять не рекомендуется [4].

Рассмотрим несколько вариантов нахождения области поиска центров вращения наиболее опасной поверхности скольжения.

В первом случае центр вращения находится на пересечении двух прямых, одна из которых проходит через бровку откоса (точка C) и точку B , лежащую на глубине H и расстоянии $4,5H$ от подошвы откоса (где H – высота откоса), а вторая проходит под углом 25° к поверхности склона (рис. 2, а). При втором варианте данная область располагается в зоне между вертикалью и нормалью, проведенными из середины поверхности склона откоса. При первом приближении центр назначается на биссектрисе угла между этими прямыми на расстоянии, равном высоте откоса (рис. 2, б).

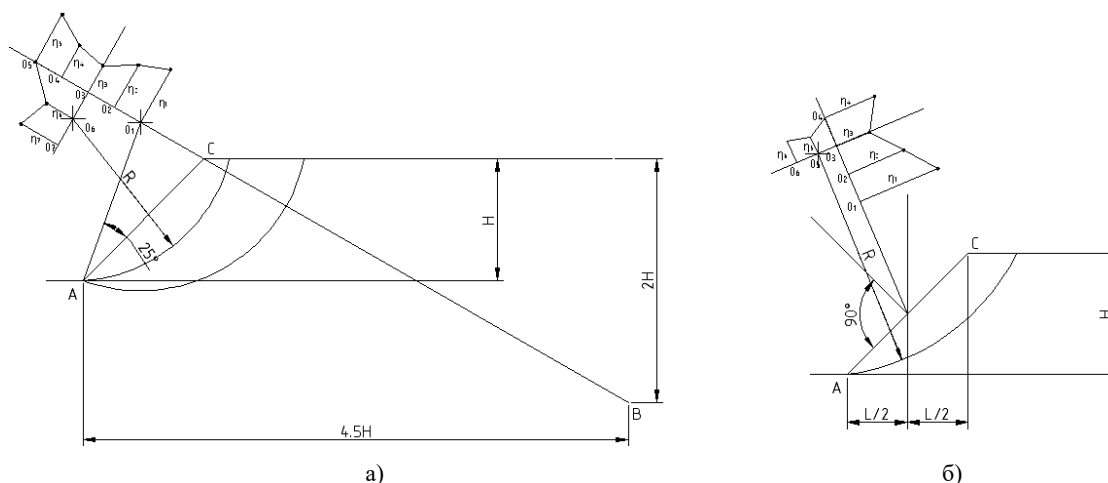


Рис. 2. Варианты нахождения области с центрами наиболее опасных поверхностей скольжения

В более ранних работах центры вращения предлагается искать вблизи линии, проведенной из бровки откоса под углом 36° [1]. Некоторые авторы, например П.Л. Иванов [5], не уделяют внимания поиску области нахождения центров наиболее опасных поверхностей скольжения, а предлагают вариант реализации метода последовательного приближения для нахождения наиболее опасной поверхности скольжения по всей области возможных центров вращения.

Из анализа данных методов можно сделать вывод, что поиск наиболее опасной поверхности скольжения достаточно субъективен. И требуются более четкие рекомендации для нахождения поверхности,

для которой коэффициент запаса будет минимальным. Либо необходимо просчитать максимальное количество поверхностей скольжения, что также позволит определить минимальный коэффициент надежности. Данный подход возможен только с помощью алгоритма, реализованного на ЭВМ.

Стоит отметить, что для простейших случаев однородных плоских откосов имеются различные вспомогательные графики для определения минимального коэффициента устойчивости и приемы, ускоряющие нахождение области центров опасных поверхностей скольжения [6]. Однако для более сложных геологических условий такие рекомендации отсутствуют.

Таким образом, можно сделать вывод, что вопрос о нахождении поверхности скольжения, для которой коэффициент запаса будет минимальным, на данный момент не решен и каких-либо конкретных рекомендаций по расчету устойчивости откосов не существует.

Исследование оползневых участков склонов г. Витебска показало, что поверхность скольжения может проходить как по коренным породам, так и вблизи поверхности склона. При этом на одном склоне можно наблюдать образование нескольких оползневых «языков», что свидетельствует о возможности образования в пределах одного откоса нескольких опасных поверхностей скольжения с различными центрами вращения. Поэтому при расчете устойчивости откосов наиболее достоверным методом определения наиболее опасной поверхности скольжения является *метод последовательных приближений с использованием ЭВМ*.

В настоящее время наиболее известными программами, позволяющими решать данную задачу, являются GeoStab, ОТКОС (КРЕДО-ДИАЛОГ), GEO5, ОТКОС (SCAD-Soft). В данных программах по-разному решен вопрос о поиске наиболее опасной поверхности скольжения [7].

Разработанная в Полоцком государственном университете *программа для расчета устойчивости откосов* является объектно-ассоциативной системой (ОАС), которая применяется для организации хранения и манипулирования сложноструктурированными данными. В работах [8] и [9] определена концепция объектно-ассоциативных систем, ее преимущества и отличительные особенности.

Использование ОАС при расчете устойчивости откосов позволяет:

- 1) задавать сложноструктурированные данные о геометрии разреза, свойствах грунтов, расположение дисперсионной кривой и линии водонапора;
- 2) производить сложные и ресурсоемкие геометрические преобразования на исходных данных (сечение разреза круглоцилиндрической поверхностью скольжения с определением геометрических и физических свойств элементарных блоков);
- 3) производить расчет коэффициента устойчивости с учетом фильтрационных сил по полученным геометрическим сечениям разреза круглоцилиндрическими поверхностями скольжения;
- 4) реализовать итерационный процесс поиска наиболее опасной (или нескольких) поверхностей скольжения;
- 5) выполнять параметрическую визуализацию результатов расчета в виде поля поверхностей скольжения, эпюры давлений, расчетной схемы.

Такие требования к программному обеспечению (ПО) расчета устойчивости откосов полностью соответствуют концептуальным возможностям ОАС, в которой отображение сложноструктурированных данных выполняется на множестве представлений (схема, поле, эпюра). Реализация данных требований в рамках иных подходов требует серьезной проектной проработки и выработки механизмов, естественных с точки зрения ОАС.

Разработка Полоцким государственным университетом ПО расчета устойчивости откосов с применением ОАС показала значительное снижение затрат на проектирование и разработку ПО благодаря эксплуатации готового механизма манипулирования и визуализации сложноструктурированных данных.

Для анализа расположения центров наиболее опасных поверхностей скольжения с помощью данной программы было выполнено несколько расчетов простейших очертаний откосов. Расчеты выполнены для откосов, сложенных однородными глинистыми и песчаными грунтами, и для откосов, имеющих слоистое напластование с различными прочностными характеристиками.

На рисунке 3, а показан результат расчета для глинистого грунта со следующими характеристиками: $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $c = 30 \text{ кПа}$; $\varphi = 10^\circ$. Здесь отмечены центры наиболее опасных поверхностей скольжения, коэффициенты устойчивости которых отличаются не более чем на 0,02. Область центров наиболее опасных поверхностей скольжения в данном случае находится в пределах зоны, ограниченной вертикалью и нормалью, проведенными из центра склона откоса, что хорошо согласуется с рекомендациями [3]. При этом почти все полученные поверхности скольжения начинаются с нижней точки основания склона откоса, что соответствует общепринятым представлениям об очертании оползней скольжения.

На рисунке 3, б приведен результат расчета для песчаного грунта со следующими характеристиками: $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $c = 10 \text{ кПа}$; $\varphi = 30^\circ$. В этом случае область центров также попадает в зону, ограниченную вертикалью и нормалью, проведенными из центра склона откоса, а поверхности скольжения проходят несколько выше основания откоса. Кроме того, в песчаных грунтах наиболее опасные поверхности скольжения расположены ближе к поверхности склона, чем в глинистых грунтах. Следует отметить, что

полученные центры наиболее опасных поверхностей скольжения для песчаных грунтов лежат практически на одной прямой.

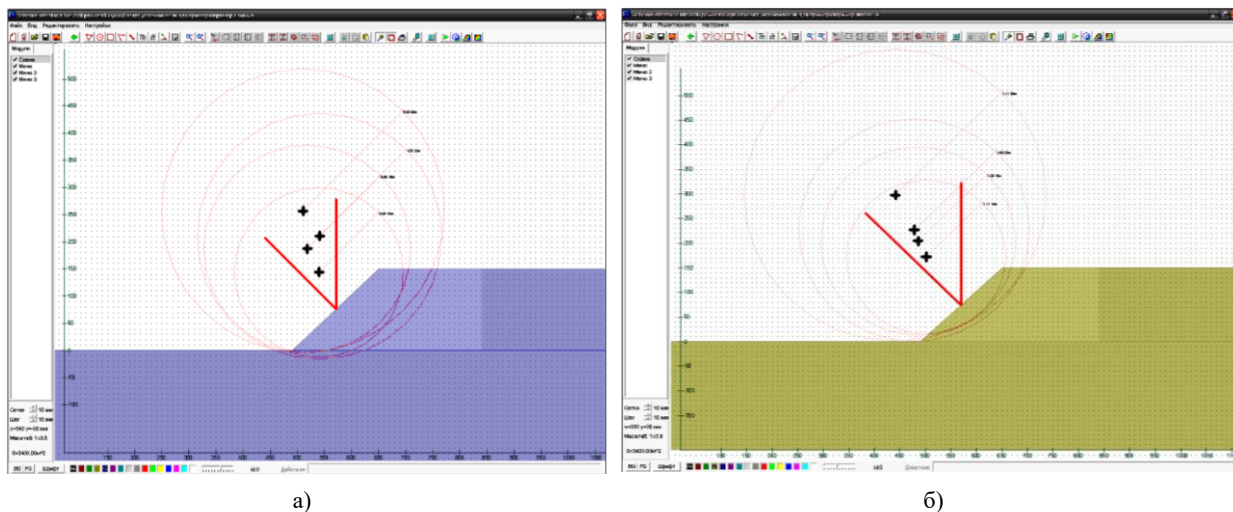


Рис. 3. Определение области центров наиболее опасных поверхностей скольжения для однородных откосов:
а – для глинистых грунтов; б – для песчаных

Для качественной оценки влияния неоднородности строения откоса на расположение центров вращения наиболее опасных поверхностей скольжения рассмотрено два случая строения откоса:

1) откос состоит из трех слоев грунта: верхний слой – глина ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $c = 30 \text{ кПа}$; $\varphi = 10^\circ$); средний – супесь ($\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$; $c = 12 \text{ кПа}$; $\varphi = 12^\circ$); нижний – песок ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $c = 10 \text{ кПа}$; $\varphi = 30^\circ$) (рис. 4, а);

2) откос состоит из трех слоев грунта: верхний слой – глина ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $c = 30 \text{ кПа}$; $\varphi = 10^\circ$); средний – супесь ($\gamma = 21 \text{ кН/м}^3$; $c = 40 \text{ кПа}$; $\varphi = 40^\circ$); нижний – песок ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $c = 10 \text{ кПа}$; $\varphi = 30^\circ$) (рис. 4, б).

В первом случае средний слой является более слабым, чем верхний и нижний, во втором – средний слой более прочный, чем слои, его окружающие.

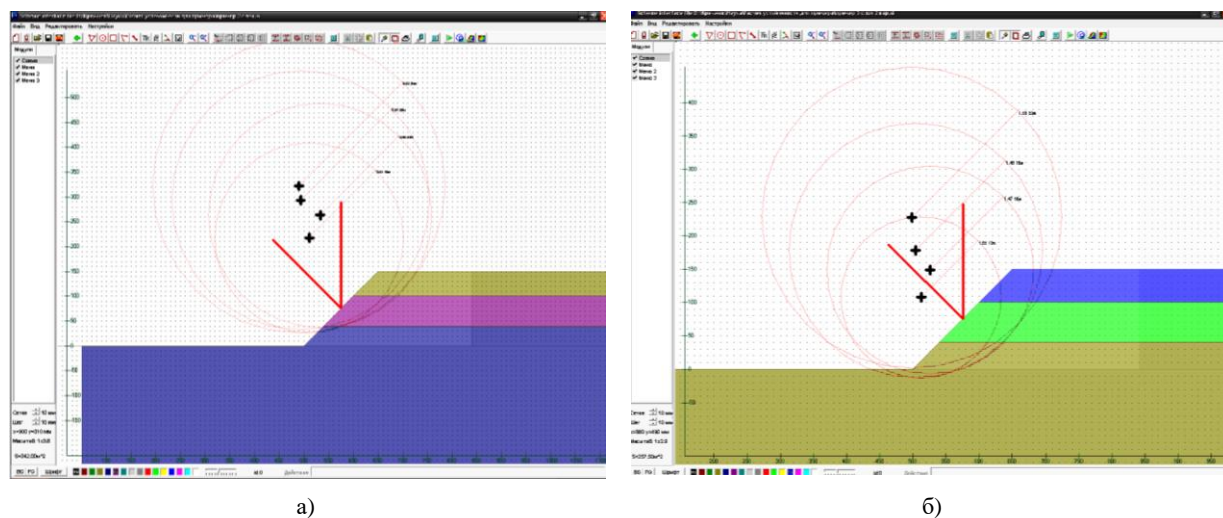


Рис. 4. Определение области центров наиболее опасных поверхностей скольжения для неоднородных откосов

По результатам расчета видно, что при среднем слабом слое область центров наиболее опасных поверхностей скольжения попадает в область, ограниченную вертикалью и нормалью, проведенными из центра склона откоса, однако опасные поверхности скольжения не проходят через основание откоса. Такой вариант в рассмотренных выше рекомендациях не обсуждался. Следовательно, при ручном выполнении расчета предусмотреть такие поверхности скольжения достаточно сложно.

При втором варианте расположения слоев грунта опасные поверхности скольжения хотя и проходят в основном через основание откоса, но не все центры попадают в область, ограниченную вертикалью

и нормалью, проведенными из центра склона откоса. Поэтому и отыскать центр опасной поверхности скольжения, выпавшей из данной области, достаточно сложно.

Как видно, для неоднородных откосов расположение центров наиболее опасных поверхностей скольжения в значительной степени зависит как от взаимного расположения слоев грунта, образующего откос, так и от характеристик данных грунтов.

В результате проведенных расчетов и анализа полученных данных можно сделать следующие **выводы**:

1) в случае однородных грунтов из существующих методов поиска центров вращения особенно опасных поверхностей скольжения наиболее точное решение дает метод, ограничивающий область поиска вертикалью и нормалью, проведенными из центра склона откоса;

2) в случае неоднородного строения откоса область поиска центров вращения необходимо выполнять итерационным методом для всех возможных поверхностей скольжения, проходящих как по коренным породам, так и вблизи поверхности склона;

3) при сложном напластовании грунтов, из которых состоит откос, возможно образование нескольких опасных призм скольжения в пределах одного склона с различными центрами вращения;

4) программа расчета устойчивости откосов, разработанная в Полоцком государственном университете, позволяет найти все опасные поверхности скольжения с широкой возможностью визуализации результатов расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Далматов, Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б.И. Далматов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1988. – 415 с.
2. Основания и фундаменты зданий и сооружений: СНБ 5.01.01-99. – Введ. 21.01.99. – Минск: Минстройархитектуры, 1999. – 36 с.
3. Предложения по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок. – М.: СоюздорНИИ совместно с ЦНИИС, 1966. – 124 с.
4. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Ч. 1. Общие правила = Еўракод 7. Геатэхнічнае праектаванне. Частка 1. Агульныя правілы: ТКП EN 1997-1-2009 (02250). – Введ. 10.12.09. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 131 с.
5. Иванов, П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: учеб. для гидротехнических спец. вузов / П.Л. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1991. – 447 с.
6. Чугаев, Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения: учеб. пособие для студентов гидротехнических спец. вузов: в 2-х ч. / Р.Р. Чугаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – Ч. 1: Глухие плотины. – 318 с.
7. Глухов, Д.О. Объектно-ассоциативный подход к построению алгоритмов расчета и визуализации пространства цилиндрических поверхностей скольжения в расчетах устойчивости откосов / Д.О. Глухов, А.П. Кремнев, Т.М. Глухова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 4. – С. 43 – 51.
8. Глухов, Д.О. Концепция объектно-ассоциативной базы данных / Д.О. Глухов, А.В. Пранович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 4. – С. 55 – 63.
9. Глухов, Д.О. Объектно-ассоциативный подход к представлению информации / Д.О. Глухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 50 – 54.

Поступила 31.05.2011

DEFINITION OF THE MOST DANGEROUS SURFACE OF SLIDING AT CALCULATION OF STABILITY OF SLOPES BY A METHOD OF CYLINDRICAL SURFACES OF SLIDING

A. KREMNEV, D. HLUKHAU, N. VISHNYAKOV

The problem of definition of the most dangerous surface of sliding is considered at calculation of stability of a slope by a method of cylindrical surfaces of sliding. Known recommendations about search of the centers of the most dangerous surfaces of sliding of various authors are considered. Realization of algorithm of calculation of stability of slopes on the computer with use of the objective-associative system developed in Polotsk state university is offered. By means of the given program the analysis of an arrangement of the most dangerous surfaces of sliding for slopes of a various geological structure is made. Conclusions are drawn on application the recommendations offered earlier about search of the centers of the most dangerous surfaces of sliding.