

УДК 624.137

В.Г. ШАПОВАЛ, д-р.техн. наук, проф., Е.С. ПРИЧИНА, И.Ю. БУЛИЧ, аспиранты,
ГВУЗ «Национальный горный университет»

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ

В данной статье выполнен анализ применения усовершенствованного метода расчета устойчивости грунтовых откосов и склонов для оценки устойчивости грунтовой плотины в рамках работ по берегоукреплению территории г. Днепропетровска. Проанализированы наиболее опасные для города Днепропетровска виды грунтовых откосов. Получены результаты расчета устойчивости грунтового откоса по стандартной методике на основе круглоцилиндрической поверхности скольжения. Применен усовершенствованный метод расчета, учитывающий формирование наиболее невыгодной ситуации загрузки за счет сочетания минимальных и максимальных характеристик грунтов, который позволил получить более достоверные результаты, чем упрощенный подход, применяемый в практике проектирования. На основе полученных данных разработаны рекомендации для внедрения в проект локальной береговой защиты.

Ключевые слова: откос, склон, грунтовая плотина, расчет устойчивости, коэффициент устойчивости, оползень.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Откосом называют боковую наклонную поверхность дорожной насыпи, холма, борта балки, карьера, берега реки. Откосы естественного образования представляют собой склоны каких-либо форм рельефа (балок, оврагов, гор, холмов). Искусственно созданные откосы являются следствием целенаправленной промышленной деятельности человека, чаще всего относящейся к отрасли строительства и архитектуры. Застройка склонов, инженерная защита уже существующих построек на наклонных площадках, устройство дорожного полотна, укрепление берегов рек и многие другие мероприятия в черте городов требуют обеспечения устойчивости откосов и склонов. Нарушение устойчивости влечет за собой разрушения разной степени, наиболее опасными среди которых являются оползни. Важным условием, обеспечивающим безопасную эксплуатацию откоса, является достоверный расчет его устойчивости.

Таким образом, проблема достоверности расчетов устойчивости грунтовых откосов является актуальной проблемой и имеет научно-практическое значение.

Анализ исследований и публикаций. Актуальность и важность исследуемой проблемы подтверждается работами многих ученых в области геотехники, геологии и фундаментостроения. Наработки современных ученых отражают необходимость совершенствования методов оценки устойчивости откосов, прогнозирования оползнеопасных ситуаций и методов борьбы с ними в рамках Днепропетровского региона и не только [1-11].

Постановка задачи. На территории города оползневые процессы разной степени опасности проявляют себя каждый год (рис.1). Самый масштабный и разрушительный оползень зафиксирован в 1997 году на ж/м Тополь (рис.2а). Последний крупный оползень сошел в ноябре 2011 года (рис.2б). Проблема устойчивости откосов возникает также в прибрежных районах города, в которых наблюдается негативное воздействие реки Днепр на рельеф берегов. Последний факт вызвал необходимость в исследовании устойчивости грунтовой плотины в рамках проектных работ по укреплению береговой линии. Таким образом, поставлена цель исследования – оценка устойчивости грунтовой плотины с применением усовершенствованной методики расчета устойчивости грунтовых откосов для последующего внедрения в проект защиты береговой линии [12].

Изложение материала и результаты. Объект исследования, грунтовая плотина для укрепления берега, находится в г. Днепропетровск на Набережной Победы 9-в (рис. 3).

В соответствии с требованиями СНиП 2.06.05-84* «Плотины из грунтовых откосов» расчет грунтовых плотин следует выполнять с использованием круглоцилиндрических поверхностей сдвига. Критерием обеспечения устойчивости откоса или зависимостью для коэффициента устойчивости k_s является условие (1)

$$k_s = \frac{R}{F} \geq \frac{\gamma_n f_c}{\gamma_c}, \quad (1)$$

где F, R – расчетные значения соответственно обобщенных сдвигающих сил и сил предельного сопротивления или моментов сил, стремящихся повернуть (опрокинуть) и удержать сооруже-

ние соответственно; $\gamma_n=1,1$ - коэффициент надежности по нагрузке; γ_c - коэффициент условий работы равный 0,95 [13].

а

б



Рис. 1. Современные оползнеопасные участки г. Днепропетровска. а) Рыбальская балка, отселенный дом вследствие подвижек склона и укрепительный контрбанкет перед ним, май, 2014 год;

б - балка Евпаторийская, май 2014 года

а

б



Рис. 2. а - Оползень на ж/м Тополь, 1997 год; б - оползень в г. Днепропетровск, Рыбальская балка, ул. Войцеховича, 2 ноября 2011 года



Рис. 3. Грунтовая плотина, расположенная по адресу Набережная Победы 9-в

Расчет устойчивости низового откоса плотины выполнялся на основе гипотезы о круглоцилиндрической поверхности скольжения с использованием стандартного и усовершенствованного методов. Первый метод расчета реализован в программном комплексе Электронный Справочник Инженера «ЭСПРИ», по которому было получено значение коэффициента устойчивости равное 2,299 (рис. 4).

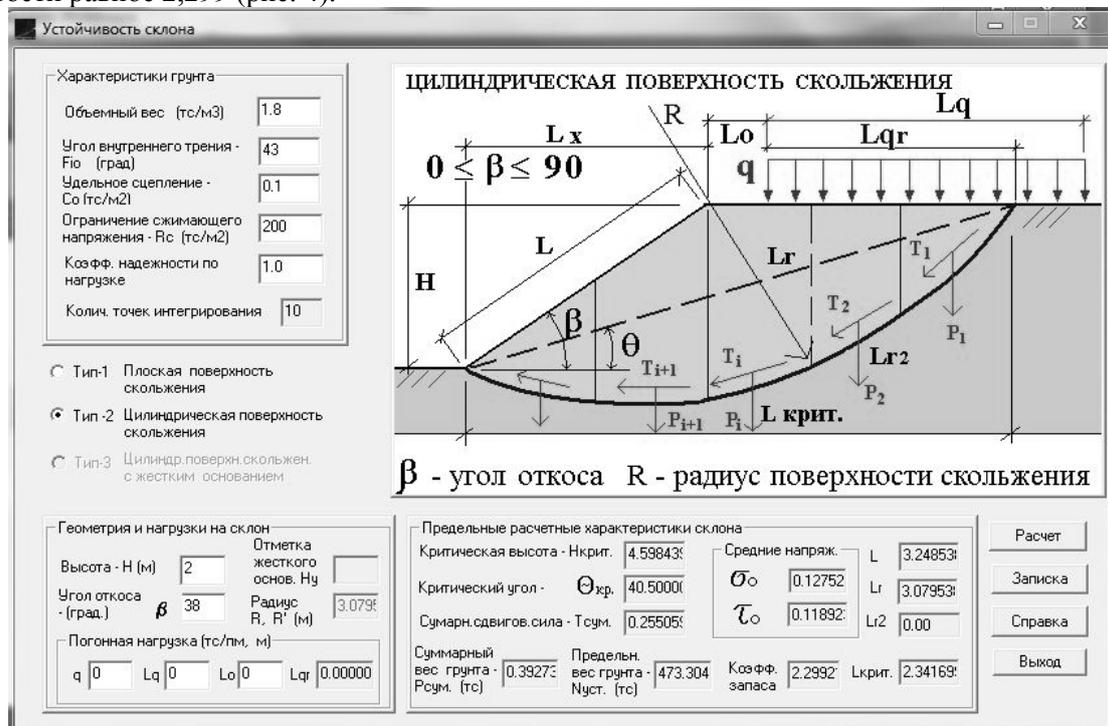


Рис. 4. Рабочее окно программы Электронный Справочник Инженера «ЭСПРИ»

Усовершенствованный подход основывался на введении расчетных значений параметров грунта с использованием методов математической статистики [14-19].

Первое необходимое действие - определение центра кривизны поверхности обрушения.

Для этого с помощью ПК «ЭСПРИ» было определено значение рабочей длины распределённой нагрузки L_{qr} и радиуса поверхности скольжения R для дамбы со следующими характеристиками грунта: объёмный вес грунта $\gamma=1,8 \text{ тс/м}^3$; угол внутреннего трения $\varphi=43^\circ$; удельное сцепление $c_0=0,01 \text{ тс/м}^2$; ограничение сжимающего напряжения $R_c=200 \text{ тс/м}^2$; коэффициент надёжности по нагрузке - 1,0.

Согласно ДБН В.2.1-10-2009 «Основания и фундаменты сооружений» для песков гравелистых и крупных с пористостью 45,0 значение угла внутреннего трения φ_n составляет 43° .

Геометрические параметры откоса плотины: высота откоса $H=2 \text{ м}$; угол откоса - 38° ; ширина верхнего основания - 1 м; ширина нижнего основания - 6,10 м. В ходе расчета были получены значения L_{qr} и L_o равными 0.

Радиус опасной поверхности скольжения составляет 3,08 м. Далее на основе полученного радиуса на расчетной схеме было определено очертание кривой обрушения (рис.5). Зона между этой дугой и низовым откосом образует призму обрушения.

Согласно расчету по методу круглоцилиндрической поверхности скольжения область, ограниченная кривой сдвига и внешними очертаниями плотины (массив обрушения), разбивается вертикальными прямыми на отсеки шириной b с определением при этом угла наклона α_i и объёма V_i каждого отсека.

При расчете величина b принимается равной $0,1 R = 0,308 \text{ м}$.

Согласно требованиям нормативных документов, при оценке устойчивости откосов следует принимать расчетные характеристики грунта и внешнюю нагрузку на него таким образом, чтобы обеспечивались наиболее невыгодные условия работы основания.

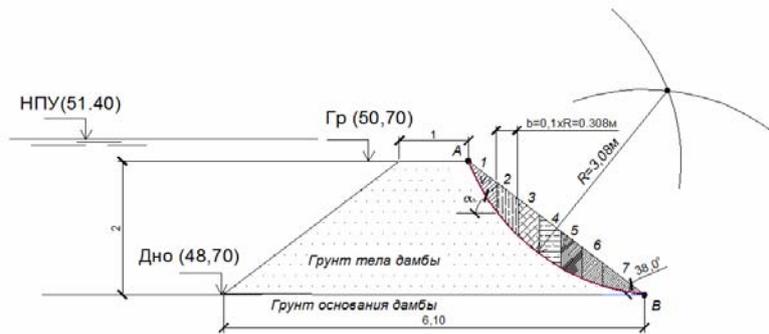


Рис. 5. Расчетная схема плотины

Таким образом, расчетные значения нагрузок и характеристик грунта определяем по формулам

$$X_p = X^H \cdot (1 + \rho), \quad (2)$$

(если характеристика входит в состав сдвигающих сил) и

$$X_p = X^H \cdot (1 - \rho), \quad (3)$$

если характеристика входит в состав удерживающих сил), где X_p – расчетная характеристика грунта; X^H – то же, нормативная (характеристическая); $(1 \pm \rho) = (1/\gamma_g)$ – величина, обратная коэффициенту безопасности по грунту (или при определении удельного веса грунта и внешних нагрузок это – коэффициент перегрузки); ρ – показатель точности (погрешности) среднего значения определяемой характеристики при статистической обработке экспериментальных данных, в нашем случае $\rho = 0,1$ [14-16].

Отличие этой методики от общепринятой заключается в том, что при определении сдвигающих и удерживающих сил используются соответственно максимальное и минимальное значения расчетных характеристик грунта, установленных с коэффициентом доверительной вероятности, равном 0,95. На практике при расчете сил удержания и сдвигаения используются лишь минимальные значения расчетных характеристик, полученных по формуле (1), которые приводят к искажению ситуации загрузки откоса и погрешностям в результатах расчетов [17-18].

Таким образом, расчетное значение удерживающих сил R для i -го отсека было определено по формуле $R_i = R_i \cdot 0,9$.

Расчетное значение сдвигающих сил F для i -го отсека определено по формуле $F_i = F_i \cdot 1,1$.

Тогда коэффициент запаса устойчивости для всего грунтового откоса равен

$$k_s = \sum R_i / \sum F_i = (0,9/1,1) \sum k_{si}, \quad (4)$$

$$\sum k_{si} = \frac{R_1 \cos \alpha_1 \operatorname{tg} \varphi + R_2 \cos \alpha_2 \operatorname{tg} \varphi + \dots + R_n \cos \alpha_n \operatorname{tg} \varphi}{F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 + \dots + F_n \sin \alpha_n}. \quad (5)$$

Данные по каждому отсеку плотины представлены в табл. 1. Таким образом, общий коэффициент устойчивости составляет $k_s = 1,39$.

Таблица 1

Данные по каждому отсеку дамбы

Угол наклона отсека, α_i , ° град	Угол наклона отсека, α , рад	Объем отсека, V_i , м ³	Удерживающая сила, R_i	Сдвигающая сила, F_i	Коэффициент устойчивости, $K_{уст}$
61,7	1,076868	0,1069	0,09	0,17	
49,1	0,856957	0,1559	0,18	0,21	
41	0,715585	0,1782	0,24	0,21	
33,7	0,588176	0,1761	0,26	0,18	
27	0,471239	0,1582	0,25	0,13	
20,8	0,363028	0,1263	0,21	0,08	
12	0,20944	0,1105	0,19	0,04	
			1,42	1,02	1,39

Проверяем условие обеспечения устойчивости дамбы $k_s = (R/F) \geq (\gamma_n \cdot \gamma_{fc} / \gamma_c)$ $k_s = 1,39 > 1,2$. Условие выполняется.

Таким образом, согласно стандартному методу расчета откоса на основе гипотезы о круглоцилиндрической поверхности скольжения было получено значение коэффициента устойчивости откоса 2,299, которое в 1,65 раз превышает результат, полученный по усовершенствованной методике, и составляющий 1,39. Полученный результат подкрепляется результатами тестовых задач для расчетов прямоугольных откосов предельной высоты, в которых расхождение

между значениями, предоставляемыми расчетами с учетом и без учета влияния разброса значений характеристик грунта, колеблется в диапазоне 1,2-1,4 раз [18-19]. Предложенная методика расчета позволяет учесть наиболее невыгодное состояние откоса и повысить запас прочности.

Выводы и направления дальнейших исследований. В ходе исследовательской работы был выполнен анализ наиболее опасных для города Днепропетровска видов грунтовых откосов.

Получены результаты, характеризующие устойчивость грунтовой плотины в рамках берегоукрепительных мероприятий по Набережной Победы г. Днепропетровска. Примененная усовершенствованная методика расчета, учитывающая формирование наиболее невыгодной ситуации загрузки за счет сочетания минимальных и максимальных характеристик грунтов, позволила получить более достоверные результаты, чем упрощенный подход, применяемый в практике проектирования.

На основе полученных данных разработаны рекомендации для проекта по защите береговой линии Набережной Победы.

Последующие исследования будут направлены на продолжение совершенствования методов расчета и выявления зависимостей состояния неустойчивых грунтовых откосов и склонов с целью достоверных прогнозов и обеспечения противооползневой защиты бортов балок г. Днепропетровска.

Список литературы

1. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. «Механика грунтов, основания и фундаменты.»: Учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
2. Гинзбург Л.К. Противооползневые сооружения [Текст]. – Днепропетровск : ЧП "Лири ЛТД", 2007. – 188 с.
3. Швец В.Б. Справочник по механике и динамике грунтов/ Швец В.Б., Гинзбург Л.К., Гольдштейн В.М. и др. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.
4. Шаповал В.Г. Механика грунтов: учебник./ [Шаповал В.Г., Седин В.Л., Шаповал А.В. и др.]. – Днепропетровск: Пороги, 2010. – 168 с.
5. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. — М.: Высш. шк., 1979, —272 с.
6. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Хозяйкина Н.В. Механика грунтов: учебный посібник. К.: Новий друк, 2008. - 128 с. іл. Рос.
7. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды [Текст]. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 240 с.б.
8. Дорфман А.Г. Вариационный метод исследования устойчивости откосов / А.Г. Дорфман // Вопросы геотехники. Проблемы механики земляного полотна железных дорог: труды ДИИЖТ – М. : Издательство "Транспорт", 1965. – № 9. – С. 17-25.
9. Артеменко Т. К., Бычков С. А. Оползни в сложных инженерно-геологических условиях// 36. наук, праць (галузево машинобуд., буд-во) / Пол. Нац. Техн. Ун-т ім. Юрія Кондратюка . - Полтава: ПолітНТУ, 2003. -Вип. 12-С 3-7.
10. Біда С.В., Великодний Ю.Й., Титаренко В.А., Ягольник А.М. Проблеми, які потребують наукових досліджень при проектуванні і будівництві в умовах зсувних територій / Галузево машинобудування і будівництво // Полтава 2002. - Вин. 9 - С. 24-27.
11. Максимова-Гуляева Н.А. К вопросу о механизме формирования поверхности скольжения оползней днепропетровского типа //Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаменто-будування: Міжвідомчий науково-технічний збірник К., 2004. - Вип. 61. - С. 352-357.
12. Отчет об инженерно-геологических изысканиях для выяснения причин подтопления жилого дома №102д по пр. Кирова в г. Днепропетровске и расчета устойчивости склона Рыбальской балки в районе дома (в 2-х книгах). - «Укрвосток-ГИИНТИЗ», Днепропетровский филиал, г. Днепропетровск, 2005 г.
13. Соболев И.С., Ежков А.Н., Горохов Е.Н. Проектирование плотины из грунтовых материалов / Методические указания для выполнения курсовых проектов и выпускных квалификационных работ студентами направления 270100 – «Строительство» и специальности 270104 – «Гидротехническое строительство».–Нижний Новгород:ННГАСУ,2010.-91с.
14. ДБН В.1.1-24:2009 . Инженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення.: будівельні норми / ДП НДІБК ; [розробники:]. – Замість СНиП 2.01.15-90; чинний від 01-07-10. – К.: Держстандарт України, 2010 – (Державний стандарт України).
15. ДБН В.2.1-10:2009. Основи та фундаменти споруд. : будівельні норми / Мінрегіонбуд України ; [розробники:]. – Чинний від 01-07-09. – К. : Держстандарт України, 2009. – 104 с. – (Державний стандарт України).
16. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний: ГОСТ 20522-2012 . – Введ. 01-07-13, 2012. – 22 с. – (Межгосударственный стандарт).
17. Методы математической оптимизации в механике грунтов. Почтман Ю.М., Колесниченко А.Л., Киев-Донецк, издательское объединение «Вища школа», Главное изд-во, 1977, 104 с.
18. К. Р. The Estimation of Gully Slope Stability in Urban areas / Prychyna. K. // The 8-th International Forum for Students and Young Researches "Widening our horizons", April 11-12, 2013 / State Institute of Higher Education "National Mining University" – Д., 2013. – Volume 2. – С. 138.
19. К вопросу адекватного использования расчетных характеристик грунтовых оснований при определении устойчивости откосов и склонов / А.В. Шаповал, Е.А. Шокарев, Слободянюк, Е.В., Е.В. Нестерова, А.В. Шокарев, В.Г. Шаповал, Е.С. Титякова, Е.С. Причина, В.А. Легенченко // Науковий вісник будівництва – Харків. : ХНУБА, 2013. – Вип. 71. – С. 487 – 493.

Рукопис подано до редакції 26.02.15