

УДК 627.51

**ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ ОТКОСОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН
НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ**

**Великий Д.И.,
Бааджи В.Г.,
Гайсюк А.Г.,**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры
denislusuj@list.ru*

Матвиенко А.А.

ПАО «Укргідропроєкт», г. Харьков

Аннотация. Задачами исследования являются анализ изменения и разработка методики определения значения коэффициента запаса на устойчивость грунтовых откосов при учете их пространственной работы. Расчет пространственной устойчивости склонов целесообразен не только для узких створов с крутыми берегами, но и в том случае, когда на небольшом расстоянии друг от друга находятся поперечники с разными инженерно-геологическими или топографическими условиями. Решая задачи устойчивости грунтовых откосов, первоначально необходимо определить, при какой геометрии (крутизны берегов плотины, продольной длины плотины без изменения формы поперечного сечения) необходимо учитывать пространственную работу сооружения. Так же, немало важным вопросом, является выбор метода расчета устойчивости грунтовых откосов в трехмерной постановке задачи.

Ключевые слова: грунтовая плотина, устойчивость, коэффициент запаса на устойчивость, откос, пространственная работа.

**ВПЛИВ ПРОСТОРОВОЇ МОДЕЛІ УКОСІВ ҐРУНТОВОЇ ГРЕБЛІ
НА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ЇХ СТІЙКОСТІ**

**Великий Д.І.,
Бааджи В.Г.,
Гайсюк А.Г.,**

*Одеська державна академія будівництва та архітектури
denislusuj@list.ru*

Матвієнко А.О.

ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харьков

Анотація. Завданнями дослідження є аналіз зміни та розробка методики визначення значення коефіцієнта запасу на стійкість ґрунтових укосів при врахуванні їх просторової роботи. Розрахунок просторової стійкості схилів доцільно виконувати не тільки для вузьких створів з крутими берегами, але і в тому випадку, коли на невеликій відстані один від одного знаходяться поперечники з різними інженерно-геологічними або топографічними умовами. Вирішуючи задачі стійкості ґрунтових укосів, спочатку необхідно визначити, при якій геометрії (крутизні берегів греблі, поздовжньої довжини греблі без зміни форми поперечного перерізу) необхідно враховувати просторову роботу споруди. Так само, чимало важливим питанням є вибір методу розрахунку стійкості ґрунтових укосів у тривимірній постановці завдання.

Ключові слова: ґрунтова гребля, стійкість, коефіцієнт запасу на стійкість, укіс, просторова робота.

INFLUENCE OF THE SPATIAL MODEL OF EARTH DAMS SLOPES ON THE RESULTS OF THE CALCULATIONS OF THEIR STABILITY

Velykyi D.I.,
Baadgi V.G.,
Gaysyuk A.G.,

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
denislusuj@list.ru

Matvienko A. A.

PJSC «Ukrhydroproject», Kharkiv

Abstract. The task of ensuring the stability of soil slopes occurs in the design of the structures for hydraulic engineering, industrial, civil, transport and other purposes. Objectives of the study are the analysis of change and development of methodology for determining value of safety factor for the stability of soil slopes considering their spatial work. The calculation of spatial stability of slopes is suitable not only for narrow sections with steep banks, but in the case when at a small distance from each other there are widths with different engineering-geological or topographical conditions. Solving the problem of slope stability of the soil, initially you need to determine at what geometry (steepness of the banks of the dam, the longitudinal length of the dam without changing the shape of the cross section) it is necessary to consider the spatial behavior of the structure. Also, another important issue is the choice of the method of calculation of stability of soil slopes in the three-dimensional formulation of the problem.

Keywords: earth dam, stability, the safety factor for stability, slope, spatial work.

Введение. Под устойчивостью грунтовых массивов обычно понимают их способность в течение длительного времени противостоять сдвигающим усилиям, сохраняя свою форму. Устойчивое положение откосов и склонов определяется соответствующим напряженно-деформированным состоянием, формируемым силовыми воздействиями. При неблагоприятном сочетании разнообразных факторов грунтовый массив, ограниченный откосом или склоном, может перейти в неравновесное состояние и потерять устойчивость. Особую значимость эта задача приобретает в гидротехническом строительстве при проектировании напорных грунтовых сооружений.

Для оценки устойчивости склонов применяются методы трех классов: историко-географические, сравнительные (или методы аналогий) и расчетные – аналитические или графические. В работе рассмотрены только расчетные методы, которые позволяют дать количественную оценку степени устойчивости склонов. Степень устойчивости необходимо знать не только для решения вопроса о надежности грунтового массива, но также и для сравнительной оценки вариантов рассматриваемого земляного сооружения, чтобы выявить экономически оптимальный вариант.

Как показывает практика эксплуатации грунтовых плотин и анализ их аварий и разрушений, основными распространенными причинами повреждений грунтовых гидротехнических сооружений являются: ошибки, допущенные при проектировании; ошибки, допущенные при производстве работ; недоброкачественные строительные материалы; ошибки, допущенные при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях, или недостаточность этих исследований; стихийные причины (землетрясения); ошибки, допущенные при эксплуатации гидросооружений; повреждения, причиняемые людьми, животными и машинами; повреждения, возникшие вследствие негативного действия фильтрационного потока [1]. Классификация главнейших причин разрушений плотин проведена А. А. Гельфером [2].

В работе рассмотрены вопросы устойчивости исключительно нескальных грунтовых массивов, сложенных породами аллювиальных отложений (супеси, суглинки). Грунт рассматривается как сплошная многокомпонентная среда, прочность которой подчиняется известному закону Кулона. Процесс нарушения устойчивости реальных грунтовых массивов

весьма сложен. Формирование области пластических деформаций и поверхности сдвигов происходит постепенно и сопровождается существенными деформациями объема и формы грунтового массива. В то же время, часть грунтового массива, не достигая предела прочности, выделяется в отдельные области, ограниченные снизу ярко выраженной поверхностью сдвига.

Цели и задачи. Целью работы является разработка метода учета пространственной работы сооружения, при расчете устойчивости эксплуатируемых и проектируемых однородных грунтовых плотин. **Задачи** – анализ изменения значения коэффициента запаса на устойчивость откосов однородных грунтовых плотин в зависимости от высоты, геометрии створа и учета их пространственной работы.

Результаты исследований. При расчетах устойчивости откосов однородных грунтовых плотин, зачастую, используется метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, предполагая, что форма поверхности скольжения постоянна, вдоль оси плотины. Однако, рассматривая реальные сооружения и соответствующие им створы, в которых они возводятся, необходимо учитывать особенность этих створов, а в частности ограничения по протяженности основания плотины и крутизне заложения откосов примыкающих к ней берегов.

Рассматривая протяженные сооружения, когда поперечное сечение плотины не изменяется на значительном расстоянии, можно предполагать, что поверхность скольжения будет иметь близкую к круглоцилиндрической. Для сооружений, расположенных в узком створе, когда поперечное сечение плотины изменяется по всей или ее большей части длины по гребню, то говорить о возможности образования круглоцилиндрической поверхности скольжения, при расчетах устойчивости низового откоса таких плотин, было бы ошибочным. В таких случаях необходимо рассматривать трехмерную работу сооружения совместно с его берегами и соответственно пространственную поверхность скольжения.

Принципиальная схема расчета устойчивости грунтовых откосов в трехмерной постановке та же, что и в условиях плоской задачи, но поиск наиболее опасной поверхности скольжения несколько более сложен. В условиях пространственной задачи необходимо найти не только координаты центра и радиус наиболее опасной поверхности скольжения, как в двухмерной задаче, но и форму этой кривой, а также положение ее в пространстве, обусловленное топографическими условиями створа.

Расчет пространственной устойчивости грунтовой насыпи или склона целесообразен не только для узких створов с крутыми берегами, но и в том случае, когда на небольшом расстоянии друг от друга находятся поперечники с разными инженерно-геологическими или топографическими условиями, причем в крайних из них условия лучше, чем в среднем. Смысл расчета заключается в том, чтобы учесть перераспределение сдвигающих сил между устойчивыми элементами плотины и менее устойчивыми элементами.

Решая задачи устойчивости грунтовых откосов, первоначально необходимо определить, при какой геометрии (крутизны берегов плотины, продольной длины плотины без изменения формы поперечного сечения) необходимо учитывать пространственную работу сооружения. Так же, немало важным вопросом, является выбор метода расчета устойчивости плотин в трехмерной постановке задачи.

Все известные инженерные методы, такие как метод В. Феллениуса, метод Терцаги, метод Терцаги-Крея, метод Петтерсона, метод вертикальных элементов, метод Иванова-Тейлора, метод весового давления и т.д. [3-10], более применимы для плоских схем и являются трудоемкими для решения поставленной задачи. В таких случаях необходимо использовать другой подход, который заключается в том, чтобы определять распределение напряжений вдоль поверхности скольжения для реального напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемой плотины. В этом случае, любые условия равновесия массива обрушения будут соблюдены, и решать задачу НДС плотины необходимо методом конечных элементов. Это позволит в любой точке плотины узнать все ее компоненты напряжений.

Так же, следует отметить, что определение значения коэффициента запаса на устойчивость низового откоса однородных грунтовых плотин, в пространственной постановке задачи, наиболее предпочтительным будет являться метод редукции. В основе этого метода

лежит принцип последовательного пропорционального одновременного снижения (увеличения) прочности (коэффициента сцепления и угла внутреннего трения грунта) и пересчет НДС массива. Согласно положенному в основу принципу, поверхность скольжения определяется автоматически, что значительно облегчает работу, связанную с определением центра кривой скольжения, ее радиуса и формы в пространстве.

Из положений механики грунтов известно, что напряженное состояние в какой-либо точке грунта рассматривается как предельное в том случае, когда незначительное добавочное воздействие нарушает равновесие и приводит грунт в неустойчивое состояние. Разрушение грунта происходит в результате преодоления внутренних сил трения и сцепления между частицами по определенным поверхностям скольжения.

В общем виде целостность и безопасность сооружения определяется коэффициентом запаса на устойчивость, представляющим собой отношение максимально возможной прочности грунта к минимальному значению, необходимому для обеспечения равновесия.

Метод снижения прочности (SRM – shear reduction method) по принципу расчета схож с методом Р.Р. Чугаева, известным в гидротехническом строительстве [11-12]. Этот метод реализован в программах, работающих на основе метода конечных элементов и конечных разностей (Plaxis, GEO5, Phase2, FLAC, Midas GTS NX). Прогноз разрушения осуществляется путем одновременного понижения обоих показателей сдвиговой прочности.

Последовательность расчета следующая: коэффициенту снижения прочности присваивается значение, которое равно 1. В ходе расчета коэффициент снижения прочности увеличивается, при этом сопротивление сдвигу и деформация оцениваются на каждом этапе до наступления разрушения. Поверхность скольжения при использовании МКЭ формируется во время расчета. Существенным преимуществом метода снижения прочности по сравнению с методами предельного равновесия является то, что поверхность скольжения и коэффициент устойчивости определяются одновременно в процессе расчета.

При поддержке ПАО «Укргідропроект», г. Харьков, а именно Матвиенко Анастасии Александровны, с применением лицензионного расчетного комплекса «Midas GTS NX» был выполнен ряд расчетов устойчивости однородных грунтовых плотин с различными геометрическими характеристиками, а именно:

- высота плотины принималась равной 8, 12 и 16 м;
- угол заложения откосов берегов 10° , 20° , 30° и 40° ;
- отношение длины основания плотины к ширине створа 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0.

Прочностные характеристики грунтов тела, основания плотины и берегов были подобраны таким образом, чтобы значение коэффициента устойчивости, при расчете плоской схемы, был приближенно равен единице.

В результате расчетов, были получены значения коэффициентов запаса устойчивости низового откоса однородной грунтовой плотины, с учетом различных геометрических характеристик. На рис. 1 представлен график изменения значения коэффициента устойчивости для плотины высотой 12 м. Значение коэффициента устойчивости низового откоса по плоской схеме для представленного графика равно 1.079.

По оси абсцисс откладывалось отношение длины основания плотины к ширине створа, по оси ординат – значение расчетного коэффициента устойчивости.

Анализируя результаты исследования, можно сделать следующие **выводы**:

1. При выборе метода расчета устойчивости грунтовых откосов, необходимо оценивать не только его геологическое строение, но и пространственное расположение расчетного створа.
2. Учет пространственной работы сооружения оказывает существенное влияние на значение коэффициента запаса на устойчивость. Для тестового примера значение коэффициента устойчивости изменялось от 1.406 до 0.922. Для плоской схемы, значение коэффициента устойчивости равно 1.079.
3. Существенную роль в изменении значения коэффициента запаса на устойчивость, в пространственной постановке задачи, оказывает геометрия створа (угол наклона берегов створа и длина основания плотины).

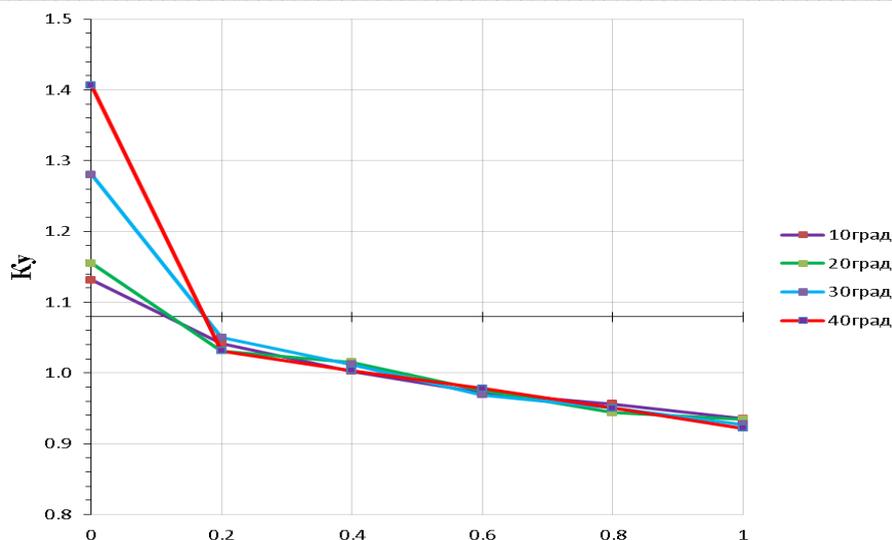


Рис. 1. Графік зміни значення коефіцієнта стійкості для плотины висотою 12 м

Литература

1. Дмитриев С.В. Устойчивость низового откоса грунтовой плотины с учетом сезонных температурных колебаний окружающей среды: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения. Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса, 2012. – 189 с.
2. Гельфер А.А. Причины и формы разрушения гидротехнических сооружений / А.А. Гельфер. – М : ОНТИ, 1936. – 319 с.
3. Гольдин А.Л. Проектирование грунтовых плотин / Л.Н. Рассказов, А.Л. Гольдин. – М: Изд-во АСВ, 2001. – 384 с.
4. Кириенко И.И. Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет. Учеб. пособие / И.И. Кириенко, Ю.А. Химерик. – К.: Высшая школа, 1987. – 253 с.
5. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов / Yand H. Huang. Пер. с англ. В.С. Забавина; Под ред. В.Г. Мельника // Перевод изд.: Stability analysis of earth slopes. – ISBN 5-274-00224-2. – М : Стройиздат, 1988. – 240 с.
6. Чугаев Р.Р. Расчет устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига / Р.Р. Чугаев. – М : Энергия, 1964. – 178 с.
7. Крей Г. Давление земли и сопротивления грунтов нагрузке / Г. Крей. Перевод с немецкого В.Н. Федоровича и Н.Н. Иванова под редакцией проф. В.К. Дмоховского. – М.-Л.: Государственное научно-техническое издательство строительной индустрии и судостроения, 1932. – 294 с.
8. Дональд В. Тейлор. Основы механики грунтов / Дональд В. Тейлор. Пер. с англ. инж. Г.Л. Игнатюка, под общ. ред. чл.-кор. акад. наук СССР проф. Н.А. Цытовича. – М : Госстройиздат, 1960. – 598 с.
9. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета) / Р.Р. Чугаев. – Л : Энергия, 1967. – 460 с.
10. Саинов М.П. Влияние напряженного состояния склона из однородного грунта на его устойчивость / М.П. Саинов. – Вестник МГСУ, 2012. – № 10. – С. 102-108.
11. Чугаев Р.Р. Расчёт устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения / Р.Р. Чугаев. – М: Госэнергоиздат, 1963. – 144 с.
12. Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик / Е.В. Федоренко. – Транспорт Российской Федерации, 2013. – №6 (49). – С. 24-26.

Стаття надійшла 2.05.2018