

УДК 627.51

**УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН  
С УЧЕТОМ ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ**

**Великий Д.И.**

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

**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. Немало важным вопросом, является и выбор метода расчета устойчивости грунтовых откосов в трехмерной постановке задачи.

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

**СТІЙКІСТЬ УКОСІВ ГРУНТОВИХ ГРЕБЕЛЬ  
З ВРАХУВАННЯМ ЇХ ПРОСТОРОВОЇ РОБОТИ**

**Великий Д.І.**

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

**Анотація.** Завданнями дослідження є аналіз зміни та розробка методики визначення значення коефіцієнта запасу на стійкість грунтових 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 грунтових укосів, спочатку необхідно визначити, при якій геометрії (крутизні берегів греблі, поздовжньої довжини греблі без зміни форми поперечного перерізу) необхідно враховувати просторову роботу споруди. Важливим питанням є і вибір методу розрахунку стійкості грунтових укосів у тривимірній постановці завдання.

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

**STABILITY OF SLOPES OF EARTH DAMS  
WITH CONSIDERATION OF THEIR SPATIAL WORK**

**Velykyi D. I.**

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

**Abstract.** The task of ensuring the stability of soil slopes occurs in the design of structures having 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 on 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 also in the case when there are widths with different engineering-geological or topographical conditions at a small distance from each other. Solving the problem of slope stability of the soil, initially you need to determine the geometry (steepness of the banks of the dam, the longitudinal length of the dam without changing the shape of the cross section) when it is necessary to consider the spatial behavior of the structure. Also, another important question 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.** Земляные плотины с древних времен являлись самыми распространенными типами водоподпорных сооружений. Эти сооружения могут возводиться из доступных и дешевых местных материалов практически в любых створах, на любых основаниях и в самых разнообразных климатических условиях. Грунтовые плотины отличаются высокими технико-экономическими показателями, высокой степенью надежности, что и определяет их широкое применение в настоящее время.

Задача обеспечения устойчивости грунтовых массивов возникает при проектировании сооружений гидротехнического, промышленного, гражданского, транспортного и других назначений. При этом в качестве грунтовых массивов выступают основания, откосы насыпей и выемок, естественные склоны при их хозяйственном использовании.

Плотины из грунтовых материалов, представляющие собой основной элемент напорного фронта гидроузлов, являются источниками потенциальной опасности. При их возможном нарушении, территории нижнего бьефа с населенными пунктами, объектами народного хозяйства, историческими памятниками и т.д. попадают в зону возможного затопления прорывной волной и могут быть уничтожены.

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.

**Объектом исследований** является низовой откос однородных грунтовых плотин.

**Методы исследований.** Численные методы исследования поведения низового откоса однородных грунтовых плотин.

**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 двумерной 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 [1-8] и т.д., 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 [9]. Этот метод реализован в программах, работающих на основе метода конечных элементов (МКЭ) 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 равным 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.

В качестве тестового примера, была выбрана однородная грунтовая плотина, высотой 8,0 метров. Прочностные характеристики грунтов тела и основания были подобраны таким образом, чтобы значение коэффициента запаса на устойчивость, при расчете плоской схемы, был приближенно равен единице (рис. 1).

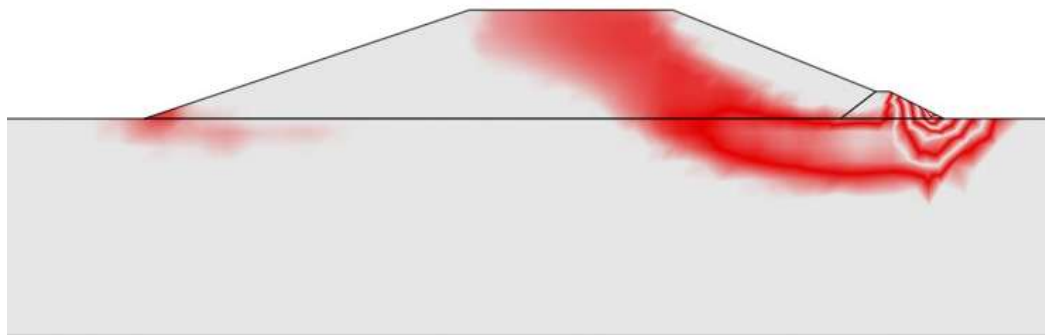


Рис. 1. Зона максимальных деформаций. Плоская схема, коэффициент запаса на устойчивость равен 1,09

Для наглядности изменения значения коэффициента запаса на устойчивость, при учете пространственной работы сооружения, был принят «треугольный» створ (угол заложения берегов составил  $40^{\circ}$ , а отношение длины основания плотины вдоль ее оси к ширине основания равен нулю) (рис. 2 и рис. 3).

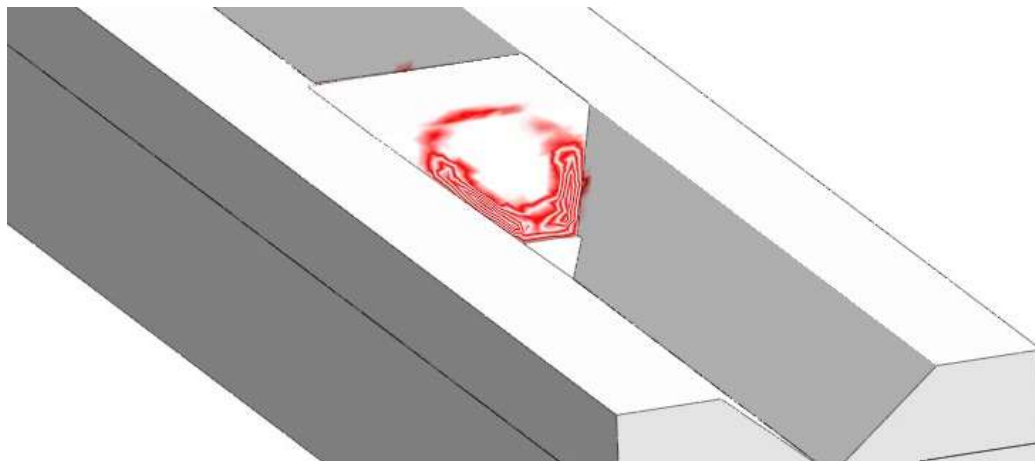


Рис. 2. Зона максимальных деформаций. Общий вид пространственной схемы

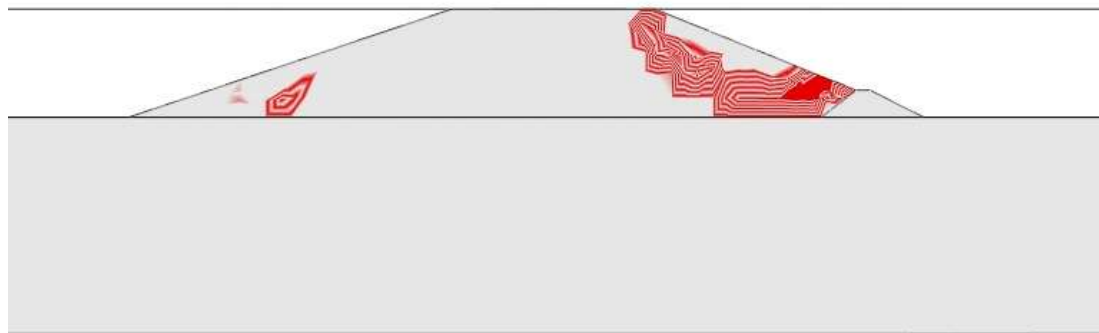


Рис. 3. Зона максимальных деформаций. Поперечное сечение плотины по дну створа пространственной схемы, коэффициент запаса на устойчивость равен 1,71

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 расхождение результатов составило **56,9 %**).
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).

### Литература

1. Гришин М.М. Гидротехнические сооружения / М.М. Гришин. – М: Госстройиздат, ч. 1, 1954. – 217 с.
2. Кириенко И.И. Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет. Учеб. пособие / И.И. Кириенко, Ю.А. Химерик. – К.: Высшая школа, 1987. – 253 с.
3. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. / Пер. с англ. В.С. Забавина; Под ред. В.Г. Мельника // Перевод изд.: *Stability analysis of earth slopes* / Yand H. Huang. – ISBN 5-274-00224-2. М.: Стройиздат, 1988. – 240 с.
4. Чугаев Р.Р. Расчет устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига / Р.Р. Чугаев. – М.: Энергия, 1964. – 178с.
5. 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. – 294с.
6. 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. – 598с.
7. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета) / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергия, 1967. – 460с.
8. Гинсбург Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления / Л.К. Гинсбург. – М: Центральное бюро научно-технической информации, 1986. – 123 с.
9. 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.

Стаття надійшла 8.08.2016