

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

П. М. Богославчик, кандидат технических наук

В. И. Селезнев, кандидат технических наук

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Аннотация

В статье анализируется метод расчета устойчивости откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения. Выявлено отсутствие единого подхода к определению гидродинамической силы фильтрационного давления. Дан анализ двух способов ее нахождения. Показана ошибочность метода, при котором фильтрационная сила определяется так же, как в случае напорной фильтрации. Рассматриваемую силу рекомендуется определять как внешнюю объемную по фильтрационному градиенту, направленную по линиям тока, что соответствует физической картине явления. Выполнены сравнительные расчеты по наиболее широко применяемым в настоящее время формулам.

Ключевые слова: *грунтовая плотина, устойчивость откоса, фильтрация, кривая депрессии, коэффициент запаса.*

Abstract

P. M. Bogoslavchik, V. I. Seleznev

ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING FILTRATION PRESSURE IN THE CALCULATION OF STABILITY OF THE SLOPES OF EARTH DAMS

The analysis of the method of calculating the stability of slopes on circular cylindrical sliding surfaces is given. The absence of an unified approach to determine the hydrodynamic force of the filtration pressure was revealed. The analysis of two known methods is given. The error of the method which determines the filtration force in the same way as in the case of pressure filtration is shown. It is recommended to determine the considered force as an external volumetric filtration gradient directed along the current lines, which corresponds to the physical picture of the phenomenon. Comparative calculations using the most popular formulas at present are performed.

Key words: *embankment, slope stability, strength, causes of failures, monitored parameters, depression curve, safety factor, expert evaluation.*

Введение

В практике проектирования широкое распространение получили методы расчетов устойчивости откосов грунтовых плотин, объединенные общим названием – «по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения». Эти методы рекомендуются нормативным документом [1, п. 8.10]. Суть их отображена на схеме (рис. 1). Предполагается, что разрушение откоса может произойти путем сползания массива грунта 1, называемого призмой обрушения, по некоторой кривой скольжения 2, которая очерчивается радиусом R из центра скольжения O .

Коэффициент запаса устойчивости призмы обрушения вычисляется по формуле

$$k_y = \frac{R}{N} \cdot \frac{n_c}{m} \geq k_n, \quad (1)$$

где R – расчетное значение обобщенной несущей способности, м;

N – расчетное значение обобщенного силового воздействия, Н;

n_c – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации – 1,0, для периода строительства и ремонта – 0,95, для особого сочетания нагрузок и воздействий – 0,9;

m – коэффициент условий работы, учитывающий тип сооружения конструкции или основания, вид материала, приближенность расчетных схем и др.;

k_n – коэффициент надежности по ответственности (назначению) сооружения, учитывающий капитальность и значимость последствий при наступлении предельного состояния.

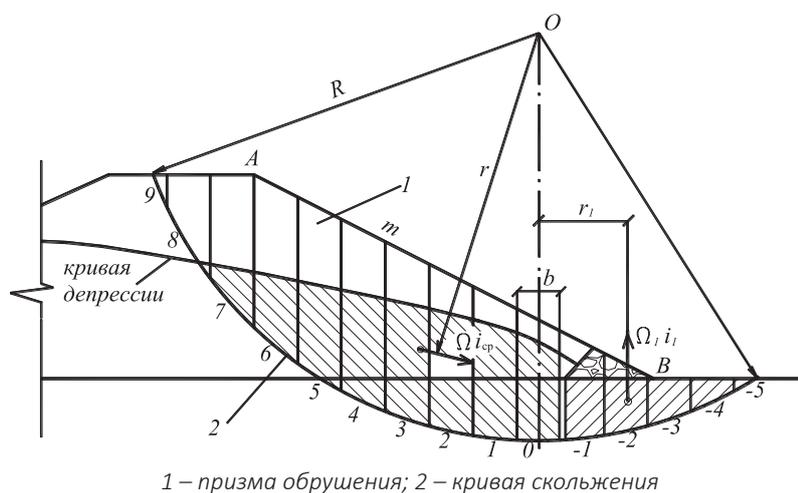


Рисунок 1 – Схема к расчету устойчивости откоса

Задача расчетов для множества кривых скольжения, проведенных из разных центров различными радиусами, – определить коэффициенты запаса устойчивости и выделить минимальный из них, который и будет расчетным для рассматриваемого откоса. Для удобства определения сил, действующих на призму обрушения, она делится на отдельные отсеки (см. рис. 1). Силы, действующие на каждый отсек, затем суммируются. Различные авторы

[2–4, 6–8] предлагают разные способы их определения, поэтому и формулы по определению коэффициента запаса устойчивости различны. Одним из нерешенных вопросов, существенно влияющим на конечный результат, является отсутствие единого подхода к определению гидродинамической силы фильтрационного давления. Цель данной работы – выработать единый подход к ее определению на основании анализа существующих способов.

Основная часть

Ряд формул, реализующих метод «по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения» отличаются, как указывалось выше, подходами к определению сил, действующих на отсеки. В задачу данной статьи не входит их анализ с точки зрения определения всех сил, действующих на откосы. Рассмотрим лишь гидродинамическую силу фильтрационного давления, возникающего вследствие движения фильтрационного потока в теле грунтовой плотины и наличия градиента фильтрации. Расчеты показывают, что именно она наиболее весомо влияет на результаты этих расчетов. Существует два способа ее определения. Для их анализа рассмотрим наиболее известные и широко применяемые в настоящее время методы расчета устойчивости откосов.

– Метод Крея:

$$k_y = \frac{1}{\sum G_i \sin \alpha_i} \sum \frac{G_i - P_{\sigma} + c_i b_i \operatorname{ctg} \varphi_i}{\cos \alpha_i \operatorname{ctg} \varphi_i + \sin \alpha_i}. \quad (2)$$

– Метод Флорина – Терцаги:

$$k_y = \frac{\sum (G_i - P_{\sigma}) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}. \quad (3)$$

– Метод Мейера – Бишоп – Ничипоровича:

$$k_y = \frac{\sum (G_i \cos \alpha_i - P_{\sigma} / \cos \alpha_i) \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}. \quad (4)$$

– Метод Чугаева:

$$k_y = \frac{\sum (G_i - P_{\sigma}) \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}. \quad (5)$$

В формулах (2–4) приняты следующие обозначения. G_i – вес i -го отсека; P_{σ} – сумма взвешивающих и фильтрационных сил, действующих на i -й отсек; α_i – угол наклона подошвы отсека к горизонту; φ_i – угол внутреннего трения грунта в подошве отсека; c_i – удельное сцепление грунта в подошве отсека; l_i – длина подошвы отсека.

В соответствии с первым способом для определения суммы взвешивающих и фильтрационных сил в формулах (3–5) авторы работ [6–8] предлагают следующую формулу (при отсутствии порового давления):

$$P_{\sigma i} = \gamma_w h_{\pi i} b, \quad (6)$$

где $h_{\pi i}$ – пьезометрический напор в центре отсека, который во избежание построения

фильтрационной сетки с достаточной точностью можно принимать равным глубине воды в рассматриваемом столбике отсека обрушения $h_в$.

Сила $P_в$ направлена вверх перпендикулярно плоскости скольжения (рис. 2).

На наш взгляд, ошибочно называть эту силу фильтрационной. Такой подход возможен в случае напорной фильтрации, если призма обрушения, а следовательно, и отсеки были бы водонепроницаемыми. В рассматриваемом случае фильтрация безнапорная, гидродинамическая сила фильтрационного давления направлена по линиям тока. Численно она зависит от градиента фильтрации, т. е. уклона кривой депрессии, что в формуле (6) не учитывается. Следовательно, по данной формуле определяется взвешивающая сила, а не сила фильтрационного давления.

Второй способ вычисления силы фильтрационного давления изложен в работах Е. А. Замарина и В. В. Фандеева [3–4]: предлагается ее определять как внешнюю сдвигающую по формуле

$$P_ф = \Omega i_{cp} \frac{r}{R} + \Omega_1 i_1 \frac{r_1}{R}, \quad (7)$$

где Ω – площадь области фильтрационного потока от кривой депрессии до кривой скольжения между точкой пересечения кривой депрессии с кривой скольжения и началом дренажа (см. рис. 1); i_{cp} – средний градиент фильтрационного потока в области Ω ; Ω_1 – площадь области фильтрационного

потока от начала дренажа до конца кривой скольжения; i_1 – средний градиент фильтрационного потока в области Ω_1 ; r – плечо силы гидродинамического фильтрационного давления Ωi_{cp} относительно точки O ; r_1 – плечо гидродинамической силы фильтрационного давления $\Omega_1 i_1$.

На наш взгляд, формула (7) соответствует физической картине силового воздействия фильтрационного потока на призму обрушения. Применив ее для методов, изложенных выше (см. формулы (2–5)), получим следующее.

– Метод Крея:

$$k_y = \frac{1}{\sum G_i \sin \alpha_i + P_ф} \sum \frac{G_i + c_i b_i \operatorname{ctg} \varphi_i}{\cos \alpha_i \operatorname{ctg} \varphi_i + \sin \alpha_i}. \quad (8)$$

– Метод Флорина – Терцаги:

$$k_y = \frac{\sum G_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i + P_ф}. \quad (9)$$

– Метод Мейера – Бишоп – Ничипоровича:

$$k_y = \sum \frac{G_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i + P_ф}. \quad (10)$$

– Метод Чугаева:

$$k_y = \sum \frac{G_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i + P_ф}. \quad (11)$$

Объединим для удобства методы, изложенные в формулах (2–5) в 1-ю группу, а в формулах (8–11) – во 2-ю.

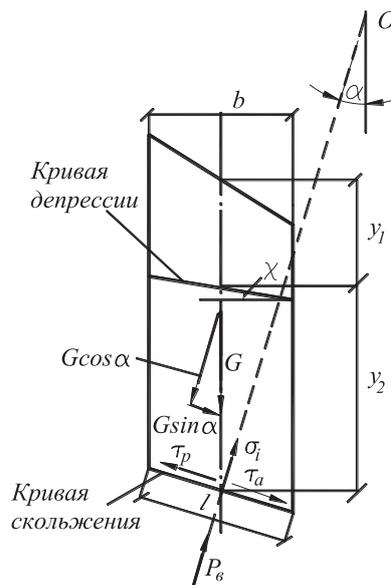


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на отсек

Для численной оценки приведенных методов были выполнены расчеты устойчивости по всем вышеприведенным формулам. Для примера взята грунтовая плотина со следующими характеристиками: высота плотины – 17,0 м. Ширина по гребню – 8,0 м. Коэффициенты заложения откосов: верхового – 4,0, низового – 3,0. Глубина воды в верхнем бьефе – 15,5 м. Грунт тела плотины – песок мелкозернистый, грунт основания – суглинок. Их характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Взвешивающее давление определялось путем уменьшения удельного веса скелета грунта, расположенного ниже кривой депрессии, на удельный вес воды. Расчеты выполнены с помощью Delfi-программы «Откос», разработанной на кафедре гидротехнического и энергетического строительства БНТУ. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что для однородной плотины, у которой кривая депрессии находится высоко и фильтрационный градиент большой, коэффициенты запаса устойчивости, подсчи-

танные методами 2-й группы, имеют значения на 15–30 % выше, чем подсчитанные методами 1-й группы. Для плотины с экраном, у которой кривая депрессии занимает положение, близкое к горизонтальному, и фильтрационный градиент стремится к нулю, коэффициенты запаса устойчивости для методов 1-й и 2-й групп практически одинаковы. Расчеты по второй группе методов позволяют несколько уменьшить коэффициент заложения откоса, что имеет определенное практическое значение.

К сожалению, полученные результаты нельзя проверить экспериментально, т. к. в силу ряда причин весьма сложно провести испытание, данные которого можно было бы признать достаточно достоверными. Но анализ физической картины разрушения откоса с математическими моделями показывает правильность формулы (7) для определения силы фильтрационного давления и, следовательно, 2-й группы методов по расчету устойчивости откосов (формулы (8–11)).

Таблица 1 – Характеристики грунтов тела плотины и основания

Грунт	Характеристики						
	$\gamma_{ск}$, кН/м ³	$\gamma_{ес}$, кН/м ³	n	c, кПа	$c_{н}$, кПа	ϕ , град.	$\phi_{н}$, град.
Песок мелкозернистый	15,8	16,7	0,390	3,0	3,0	32	27
Суглинок	17,0	18,0	0,350	30,0	20,0	27	20

Таблица 2 – Результаты расчетов коэффициента запаса устойчивости

Тип плотины	Методы определения фильтрационного давления	Коэффициенты устойчивости по формулам			
		Крея	Флорина – Терцаги	Мейера – Бишопа – Ничипоровича	Чугаева
Однородная	1-я группа	1,16	1,13	0,99	1,24
	2-я группа	1,33	1,29	1,29	1,41
С экраном	1-я группа	1,83	1,70	1,63	1,91
	2-я группа	1,81	1,71	1,71	1,93

Заключение

На основании анализа методов определения силы фильтрационного давления при расчете устойчивости откосов грунтовых плотин предлагается ее находить как внешнюю сдвигающую, величина которой зависит от положения кривой депрессии и величины фильтрационного градиента – формула (7). Сравнительные

расчеты по двум группам методов показали, что коэффициент запаса, полученный с использованием формулы (7), т. е. по методам второй группы, на 15–30% выше, чем подсчитанный методами 1-й группы, в которых для определения силы фильтрационного давления использовалась формула (6), что имеет практическое значение.

Библиографический список

1. Плотины из грунтовых материалов. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-3.04-150-2009 (02250). – Введ. с 01.03.2010. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 52 с.
2. Ничипорович, А. А. Плотины из местных материалов / А. А. Ничипорович. – М. : Стройиздат, 1973. – 320 с.
3. Замарин, Е. А. Гидротехнические сооружения / Е. А. Замарин, В. В. Фандеев. – М. : Колос, 1965. – 623 с.
4. Волков, И. М. Гидротехнические сооружения : учеб. пособие для вузов / И. М. Волков, П. Ф. Кононенко, И. К. Федичкин. – М. : Колос, 1968. – 464 с.
5. Гидротехнические сооружения / под ред. В. П. Недриги. – М. : Стройиздат, 1983. – 543 с. – (Справочник проектировщика).
6. Розанов, Н. Н. Плотины из грунтовых материалов / Н. Н. Розанов. – М. : Стройиздат, 1983. – 295 с.
7. Гольдин, А. Л. Проектирование грунтовых плотин : учеб. пособие для вузов / А. Л. Гольдин, Л. Н. Рассказов. – М. : Энергоатомиздат. 1987. – 304 с.
8. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. Ч. 1 / под ред. Л. Н. Рассказова. – М. : Стройиздат, 1996. – 435 с.
9. Чугаев, Р. Р. Гидротехнические сооружения : учеб. пособие для вузов : в 2 ч. / Р. Р. Чугаев. – 2-е изд., перераб. и доп.– М. : Агропромиздат, 1985. – Ч. 1 : Глухие плотины. – 318 с.

Поступила 11.11.2019