

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.

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. Одним из нерешенных вопросов, существенно влияющим на конечный результат, является отсутствие единого подхода к определению гидродинамической силы фильтрационного давления. Существует два способа ее определения. Для их анализа рассмотрим наиболее известные и популярные в настоящее время методы расчета устойчивости откосов.

– Метод Крея:

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

– Метод Флорина – Терцаги:

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

– Метод Мейера – Бишоп – Ничипоровича:

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

– Метод Чугаева:

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

В формулах (2–4) приняты следующие обозначения. G_i – вес i -го отсека; P_i – 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 [1–2] предлагают следующую формулу (при отсутствии порового давления):

$$P_i = P_{vi} + P_{\phi i} = \gamma_w h_{\text{ни}} b, \quad (6)$$

где P_{vi} – сумма взвешивающих сил, действующих на i -й отсек;

$P_{\phi i}$ – сумма фильтрационных сил, действующих на i -й отсек;

$h_{\text{ни}}$ – пьезометрический напор в центре отсека, который во избежание построения фильтрационной сетки с достаточной точностью можно принимать равным глубине воды в рассматриваемом столбике отсека обрушения $h_{\text{в}}$.

Сила P_i направлена вверх перпендикулярно плоскости скольжения.

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

$$P_{\phi} = \Omega i_{\text{ср}} \frac{r}{R} + \Omega_1 i_1 \frac{r_1}{R}, \quad (7)$$

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); $i_{\text{ср}}$ – 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 $\Omega i_{\text{ср}}$ относительно точки O ; r_1 – плечо гидродинамической силы фильтрационного давления $\Omega_1 i_1$.

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.

Расчеты выполнены с помощью Delfi-программы “Откос”, разработанной на кафедре гидротехнического и энергетического строительства БНТУ. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Характеристики грунтов тела плотины и основания

Грунт	Характеристики						
	$\gamma_{\text{ск}}$, кН/м ³	$\gamma_{\text{ес}}$, кН/м ³	n	c, кПа	c _н , кПа	φ , град.	$\varphi_{\text{н}}$, град.
Песок	15,8	16,7	0,390	3,0	3,0	32	27

мелкозернистый							
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

Из табл. 2 видно, что для однородной плотины коэффициенты запаса устойчивости, подсчитанные методами 2-й группы, имеют значения на 15–30 % выше, чем подсчитанные методами 1-й группы.

На наш взгляд, ошибочно называть силу, определенную по формуле (6), фильтрационной, т.к. здесь не учитывается градиент фильтрации. Формула (7), на наш взгляд, соответствует физической картине силового воздействия фильтрационного потока на призму обрушения. Взвешивающее давление в этом случае определяется отдельно путем уменьшения удельного веса скелета грунта, расположенного ниже кривой депрессии, на удельный вес воды.

Выводы

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)).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гидротехнические сооружения. В 2 ч. / под ред. Л.Н. Рассказова – М.:Стройиздат, 1996.
2. Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н. Проектирование грунтовых плотин. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1987.
3. Замарин Е.А., Фандеев В.В. Гидротехнические сооружения. – М.:Колос, 1965.
4. Волков И.М., Кононенко П.Ф., Федичкин И.К. Гидротехнические сооружения. Учебное пособие для вузов. – М.: Колос, 1968.