

УДК 626/627

Д. Т. Палуанов

Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент,
Республика Узбекистан

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ОСНОВАНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

В данной статье приводится расчет основания низконапорной плотины, имеющего в своем составе водонасыщенные грунты – пльвуны, которые влияют на безопасность эксплуатации сооружения в целом. По полученным теоретическим зависимостям установлены критерии безопасности пльвуна, с помощью которых можно произвести качественную оценку его движения в основании плотины под действием сил тяжести и гидродинамического давления фильтрационного потока воды.

Ключевые слова: модель, критерии безопасности, основание, низконапорные гидротехнические сооружения, грунт, пльвун, плотина.

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам строительства низконапорных гидротехнических сооружений, которые играют важную роль в гидротехнической практике, в том числе в рациональном использовании воды различными отраслями экономики страны, особенно в целях орошения сельскохозяйственных культур, водоснабжения и гидроэнергетики.

Вместе с этим существует достаточно большое количество ограничений при возведении низконапорных гидротехнических сооружений, связанных с отсутствием нормативно-технической и проектной документации для их строительства в сложных инженерно-геологических условиях, в частности при строительстве гидротехнических сооружений на пльвунах, образовавшихся в результате разжижения грунтов за счет внешних сил. В этом случае следует учитывать движение пльвуна и установить предельно допустимую нагрузку на него.

Известно, что правильный расчет нагрузки на основание гидротехнического сооружения при наличии в его составе пльвунов является достаточно сложным процессом. Кроме того, из-за отсутствия мониторинговых исследований, должного технического обслуживания в настоящее время наблюдается снижение уровня безопасности многих отечественных сооружений.

В качестве примера можно привести аварию, произошедшую на водовыпускном сооружении Междуреченского водохранилища Республики Узбекистан. Плотина Междуреченского гидроузла – бетонная, высота сооружения – 8 м. Как показали результаты проведенных исследований, проектирование и строительство основания водовыпускного сооружения данного гидроузла проводились с выполнением условий КМК [1], но, несмотря на это, имела место авария, которая стала причиной его разрушения. Территория строительства сооружений характеризовалась сложными инженерно-геологическими условиями и ранее считалась непригодной для возведения подобных объектов.

Обследование разрушенного сооружения проводили ученые и компетентные в данной сфере специалисты, которые обозначили следующие возможные причины аварии гидроузла: недостаточная прочность бетона, появление механической суффозии, необоснованный выбор места строительства и закладки фундамента, низкая несущая способность грунта основания и др. Но по результатам проведенной экспертизы было выявлено, что разрушение произошло вследствие возникновения пльвуна в основании сооружения.

Установлено, что пльвун обладает способностью к текучести. Поэтому опираясь на результаты проведенной экспертизы, автором сформулирована гипотеза причины

произошедшей аварии на плотине Междуреченского гидроузла, согласно которой равнодействующая сила тяжести и сила гидродинамического давления фильтрационного потока способствовали движению плывуна, в результате чего образовался выпор грунта из-под основания сооружения.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим движение плывуна в основании низконапорного гидротехнического сооружения за счет его силы тяжести и гидродинамического давления фильтрационного потока воды.

Фактически движение плывуна зависит не только от геометрических характеристик сооружения, но и от таких факторов, как движущая сила плывуна со стороны верхнего бьефа P (кН), собственный вес сооружения G (кН), сила сопротивления плывуна со стороны нижнего бьефа F (кН), сила реакции водонепроницаемой части основания Ω (кН), кинематическая вязкость плывуна ν (м²/с), плотность воды ρ_v (кН/м³), плотность плывуна ρ_r (кН/м³) и удельный вес грунта между телом сооружения и плывуном γ (кН/м³).

Предполагается, что начальный объем плывуна V (м³) будет равен:

$$V = l_0 h b,$$

где l_0 – начальная длина, м;

h – толщина плывуна, м;

b – ширина, м.

Напор воды со стороны верхнего бьефа сооружений принимается H_1 (м), а напор воды со стороны нижнего бьефа – H_2 (м). Под действием силы тяжести сооружений и гидродинамического давления фильтрационного потока воды происходит перемещение плывуна в горизонтальном направлении в слое G_1 , где k – коэффициент фильтрации (м/сут) (рисунок 1).

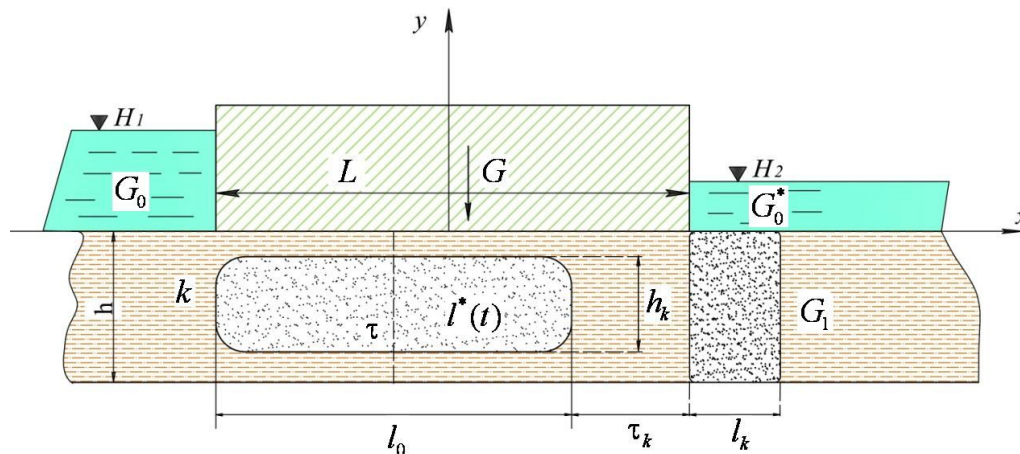


Рисунок 1 – Модель для расчета основания сооружений

Предполагается, что водонасыщенный грунт в области G_1 является упругой средой, и с помощью решения задачи о штампе [2] определяются: напряженное состояние плывуна, компоненты тензора напряжения и тензора деформации, а также перемещения каждой частицы плывуна. Расчеты показывают, что нормальное напряжение P_{yy} (Па) намного больше, чем напряжение по оси x – P_{xx} (Па) и касательное напряжение в плоскости x, y – P_{xy} (Па):

$$P_{yy} \gg \{P_{xx}, P_{xy}\}.$$

Проведенные числовые расчеты показывают, что плывун длиной $l(t)$ (м) под воздействием давления воды и сопротивления расположенного впереди слоя сжи-

мается, и возникает ползущее движение пльвуна, который перемещается в сторону нижнего бьефа. Когда движущаяся масса водонасыщенного грунта достигает границы водонепроницаемой части флотбета сооружения, происходит выпор грунта из-под основания сооружения.

Рассмотрим простейшую модель сжатия и переноса слоя водонасыщенного грунта из-под основания сооружения. В задаче о штампе определены перемещения частиц пльвуна. В связи с этим будем рассматривать движение несжимаемой водонасыщенной грунтовой массы (пльвуна) в области G_1 с длиной слоя $l(t)$.

Учитывая параметры сооружения и его основания, записываем силы, действующие на пльвун в следующем виде [3]:

- движущая сила $P = bh\rho_b(H_1 - H_2)g$;
- вес сооружения $G = f_{тр} P_{yy} bL - (L - l(t))\rho_r b h g$;
- сила сопротивления $F = \rho_r l_k h_k g b$;
- сила реакции водонепроницаемой части основания $\Omega = \tau_{xy} bL$.

Для равновесия пльвуна все силы, действующие на него, должны быть равными нулю. Поэтому, учитывая силы инерции, составим уравнение движения для центра пльвуна толщиной h , шириной b и длиной $l(t) = l_0 + l'(t)$:

$$\frac{1}{2} \rho_r l(t) b h \frac{d^2 l(t)}{dt^2} = bh\rho_b(H_1 - H_2)g - f_{тр} P_{yy} bL - (L - l(t))\rho_r b h g - \rho_r l_k h_k g b - \tau_{xy} bL. \quad (1)$$

Полностью пльвун не сжимается, в левой части уравнения (1) можно принять $l(t) \approx l_0$, и тогда уравнение имеет вид:

$$\frac{l(t)}{2} \frac{d^2 l(t)}{dt^2} = g \left[l(t) + \frac{\rho_b}{\rho_r} (H_1 - H_2) + f_{тр} \frac{P_{yy} L}{\rho_r g h} - \left(L - l_k h_k \frac{\rho_b}{\rho_r} \right) - \frac{\tau_{xy} L}{\rho_r g h} \right]. \quad (2)$$

Для облегчения решения задачи введем безразмерные величины:

$$\tau, \hat{l}(t), l(t) = l_0 \hat{l}(t), t = \sqrt{\frac{l_0}{g}} \tau, l_0 = h \hat{l}_0, l_k = l_0 \hat{l}_k, h_k = l_0 \hat{h}_k, H_1 = l_0 \hat{H}_1, H_2 = l_0 \hat{H}_2.$$

Теперь уравнение (2) следующее:

$$\frac{d^2 \hat{l}(t)}{d\tau^2} = \frac{\rho_b}{\rho_r} \hat{H}_1 + f_{тр} \frac{P_{yy} L}{\rho_r g l_0 b} + \hat{h} \hat{l}(\tau) - \left(\hat{L} + \hat{h}_2 \frac{\rho_b}{\rho_r} + \hat{l}_k \frac{\hat{h}_k}{\hat{h}} \right) + \hat{l}(\tau). \quad (3)$$

Первую часть уравнения (3) обозначаем D_1 , а левую – D_2 , то есть:

$$D_1 = \frac{\rho_b}{\rho_r} \hat{H}_1 + \frac{f_{тр} P_{yy} L}{\rho_r g l_0 b}; \quad D_2 = \frac{L}{l_0} + \hat{l}_k \hat{h}_k \frac{\rho_b}{\rho_r} \frac{1}{\hat{l}_0}. \quad (4)$$

Последнюю часть в уравнении (2) обозначаем как:

$$\hat{a}_0 = \left(1 - \frac{\tau_{xy} \hat{L}}{\rho_r g h} \right). \quad (5)$$

Полученное уравнение (5) является определяющим фактором, так называемым критерием безопасности пльвуна.

После введения обозначений уравнение (3) примет вид:

$$\frac{d^2 \hat{l}(t)}{d\tau^2} = \hat{a}_0 \hat{l}(t) + (D_1 - D_2). \quad (6)$$

Для решения уравнения (6) используем следующие начальные условия:

$$\left. \frac{d\hat{l}}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad \hat{l}(0) = 1, \quad (7)$$

а также уравнение скорости движения центра плывуна:

$$\frac{d^2 l(t)}{d\tau^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dl}{d\tau} \right) = \frac{dl(\tau)}{d\tau} = \frac{dl}{dl} \frac{dl}{d\tau} = l \frac{dl}{dl} = \frac{1}{2} \frac{d(l)^2}{dl}. \quad (8)$$

Проведем преобразование уравнения, введя новую функцию l , и получим равенство:

$$l(\tau) = \frac{dl(\tau)}{d\tau}. \quad (9)$$

Тогда уравнение (8) представим как:

$$\frac{d^2 l(\tau)}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \frac{d(l(\tau)^2)}{dl(\tau)}.$$

Уравнение (6) примет вид:

$$\frac{1}{2} \frac{dl^2}{dl} = 2a_0 l + 2(D_1 - D_2), \quad (10)$$

разделяя по переменным, получим уравнение:

$$d(l)^2 = [2a_0 l(\tau) + 2(D_1 - D_2)] dl, \\ (l)^2 = 2a_0 l^2(\tau) + 4(D_1 - D_2)l(\tau) - 4(D_1 - D_2)a_0 l_0 - 2a_0 l_0^2.$$

Полученное уравнение можно записать:

$$l(\tau) = \pm \sqrt{a_0} \sqrt{l^2(\tau) + 2(D_1^* - D_2^*)l(\tau) - l_0^2 - 2(D_1^* - D_2^*)l_0}. \quad (11)$$

Так как скорость центра подвижного плывуна равна $l(\tau) = \frac{dl(\tau)}{d\tau}$, введем безразмерные параметры:

$$D_1^* = \frac{D_1}{a_0}, \quad D_2^* = \frac{D_2}{a_0}. \quad (12)$$

Уравнение (11) представим в виде:

$$l(\tau) = \frac{dl(\tau)}{d\tau} = \pm \sqrt{(l(\tau) - l_0)[l(\tau) + l_0 + 2(D_1^* - D_2^*)]} = \\ = \pm \sqrt{(l(\tau) + (D_1^* - D_2^*)) \sqrt{2a_0 - l_0(D_1^* - D_2^*)}}. \quad (13)$$

Введем переменную

$$\eta(\tau) = \hat{l}(\tau) + (D_1^* - D_2^*).$$

Тогда $\eta(0) = \hat{l}_0 + (D_1^* - D_2^*)$.

Теперь уравнение (13) выглядит как:

$$d\hat{l}(\tau) = \pm \sqrt{\eta(\tau)^2 - \eta_0^2} d\tau \sqrt{2a_0}. \quad (14)$$

Для интегрирования полученных уравнений проведем разделение переменных:

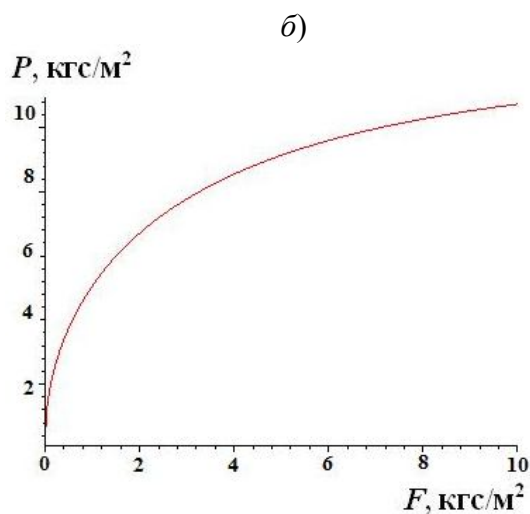
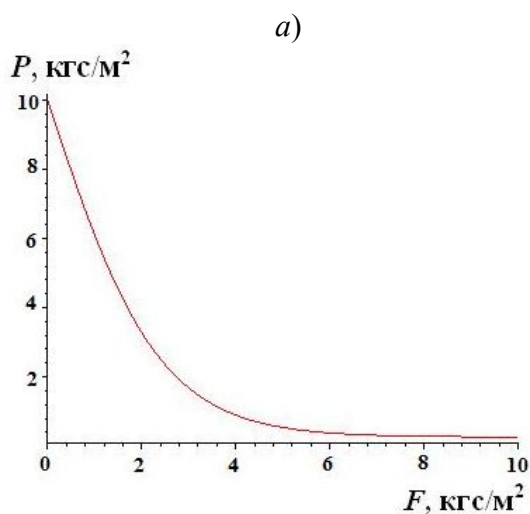
$$d\tau = \pm \sqrt{2} \sqrt{a_0} \frac{d\eta(\tau)}{\eta(\tau)^2 - \eta_0^2}. \quad (15)$$

Решение уравнения (5) с учетом уравнения (15) позволило установить следующее:

- если $a_0 > 0$, то $\rho_r gh > \tau_{xy}$, тогда $\eta(\tau) > \eta_0^2$ и $\hat{l}(\tau) > \hat{l}_0$, в этом случае наблюдается поступательное движение плывуна в сторону нижнего бьефа, что в последующем приведет к выпору грунта основания сооружения (рисунок 2).

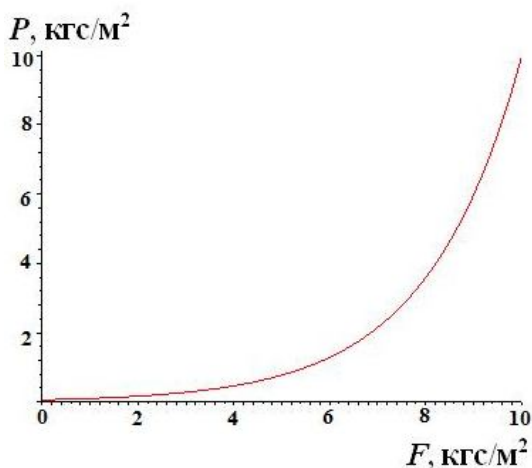
Анализ рисунка 2 показывает, что с увеличением уровня воды в верхнем бьефе возрастает сила фильтрационного давления, и это обстоятельство может привести к выпору грунта основания сооружения. Движение плывуна в течение времени не останавливается, и это означает, что необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению устойчивости основания сооружения;

- если $a_0 < 0$, то $\rho_r gh < \tau_{xy}$, тогда $\eta_{(\tau)}^2 < \eta_0^2$ и $\hat{l}(\tau) < \hat{l}_0$, $\eta_0^2 - \eta_{(\tau)}^2 > 0$, в этом случае наблюдается устойчивое перемещение плывуна в основании сооружений (рисунок 3).



Анализируя рисунок 3, можно сделать вывод о том, что такой случай в гидротехническом строительстве вообще не встречается, так как силы, действующие со стороны нижнего бьефа, не будут больше сил, действующих со стороны верхнего бьефа. Однако в данном случае обеспечивается устойчивость основания сооружения;

- если $a_0 = 0$, то $\rho_r gh = \tau_{xy}$, тогда $\eta_{(\tau)}^2 = \eta_0^2$ и $\hat{l}(\tau) = \hat{l}_0$, в данном случае вес сооружения и гидродинамическое давление воды приведет к равновесному состоянию плывуна в основании сооружения (рисунок 4).



Как показано на рисунке 4, равновесие движущих сил и сил сопротивления обеспечивает устойчивость основания сооружения во времени, однако данный случай также не встречается в гидротехнике.

Вывод. По результатам проведенных теоретических исследований установлены критерии безопасности плывуна, с помощью которых можно произвести качественную оценку его движения в основании плотины под действием сил тяжести и гидродинамического давления фильтрационного потока воды.

Список использованных источников

- 1 КМК 2.02.02-98. Основания гидротехнических сооружений. – Ташкент, 1998. – 126 с.
- 2 Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – В 2 т. – М.: Наука, 1976. – Т. 2. – 574 с.
- 3 Палуанов, Д. Т. Установление критериев безопасности основания гидротехнических сооружений / Д. Т. Палуанов // Сборник научных трудов конференции, посвященной 85-летию САНИИРИ. – Ташкент, 2010. – С. 178–183.

УДК 627.831:532.5-1/-9

А. И. Тищенко, Е. Д. Михайлов

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОТОКА ПРИ РАЗМЫВЕ ПЕСЧАНОЙ ВСТАВКИ РЕЗЕРВНОГО ВОДОСБРОСА

Цель работы – исследовать транспортирующую способность потока при размыве песчаной вставки резервного водосброса. Для решения данной задачи были использованы общепринятые методы гидравлических расчетов. При этом в работе описан механизм размыва грунта вставки при воздействии поверхностного потока. В статье представлены экспериментальные данные расходов наносов, полученные в лаборатории кафедры гидротехнических сооружений и строительной механики НИМИ им. А. К. Кортунова ФГБОУ ВО ДГАУ. С помощью теории планирования эксперимента получена полуэмпирическая зависимость для определения транспортирующей способности потока при размыве песчаной вставки резервного водосброса.

Ключевые слова: резервный водосброс, транспортирующая способность потока, песчаная вставка, гидротехнические сооружения, грунтовая плотина.

Исследования водосбросов с переливом через гребень грунтовых плотин были впервые начаты в 50-е гг. прошлого столетия в НИУ МГСУ П. И. Гордиенко и продолжены Ю. П. Правдивцем и другими исследователями [1, 2].

Как отмечается в работе Г. К. Дерюгина [3], актуальность безопасности низконапорных гидроузлов подтверждается тем, что около 44 % грунтовых плотин разрушилось из-за недостаточной пропускной способности водосбросных сооружений. Это связано с заилением прудов и водохранилищ, вследствие чего происходит уменьшение их регулирующей емкости и увеличение сбросных расходов воды при паводках [4–6]. Интерес к исследованию данного вопроса связан с идеей обеспечения необходимой пропускной способностью низконапорные гидроузлы. Для решения такой задачи рекомендуется включать в их состав резервные водосбросы с размываемой грунтовой вставкой в дополнение к основным водосбросным сооружениям [7].

Резервный водосброс представляет собой водосливной порог, на который сверху уложены защитное покрытие из геомембраны и размываемая грунтовая вставка. Принцип работы резервного водосброса заключается в том, что когда основной водосброс не справляется с пропуском паводка расчетной обеспеченности, то происходит аккумуляция воды в водоеме и в определенный момент времени, когда уровень воды достигнет форсированного подпорного уровня (ФПУ), произойдет перелив через гребень вставки водного потока и ее размыв [8, 9].

Целью данной работы являлось определение основных гидравлических характеристик при размыве грунтовой вставки водосброса. Основная задача при исследовании любого процесса размыва состоит в нахождении зависимости по определению транс-