

Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Михневич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Для обеспечения устойчивости откосов земляных плотин при воздействии волн применяют различные типы креплений, среди которых чаще всего используют каменную наброску и сборные или монолитные железобетонные плиты. Долговечность и надежность креплений во многом зависят от того, насколько правильно рассчитаны и соответственно выполнены параметры креплений: диаметр материала каменной наброски и толщина железобетонных плит. Значения параметров креплений, рассчитанные по существующим формулам, значительно различаются. Некоторые из этих формул не пригодны для малых водохранилищ Беларуси и дают реальные результаты только для крупных водохранилищ, где высота волн достигает 2 м и более. С целью определения диаметра камня наброски и толщины плит для крепления откосов плотин в зоне активного волнового воздействия предложена новая методика расчета, пригодная для водохранилищ различных размеров, в том числе и малых водохранилищ Беларуси. Методика разработана на основе теории предельного равновесия сдвигающих и удерживающих сил на откосе. При расчете диаметра материала каменной наброски учтены сдвигающие силы: взвешивающее волновое давление, зависящее от высоты волны; влекущая сила потока, образующегося на откосе при откате волны; сдвигающий компонент силы тяжести материала крепления, зависящий от заданного коэффициента заложения откоса. Удерживающие силы определены с учетом основных физико-механических свойств материала наброски: плотности частиц во взвешенном водой состоянии, пористости, внутреннего трения и удерживающего компонента силы тяжести материала крепления. При разработке методики расчета толщины железобетонных плит влекущая сила потока не учитывалась, так как формируемый на поверхности плит поток практически не оказывает влияния на их устойчивость. В нижней зоне откоса, где гидродинамическое давление создается придонной скоростью, устраивают облегченное крепление, обычно в виде наброски из щебня, гравия или мелкого камня. В результате преобразования критерия устойчивости откоса в этой зоне получены зависимости для определения крупности материала наброски. Предложенные формулы для расчета параметров креплений откосов земляных плотин могут быть рекомендованы к применению в проектных организациях.

Ключевые слова: земляные плотины, крепления откосов, волновое воздействие, каменная наброска, железобетонные плиты, расчетные формулы

Для цитирования: Михневич, Э. И. Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия / Э. И. Михневич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 100–105. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-100-105

Methodology for Calculation of Rigidity in Earth Dam Slope Protection under Conditions of Wave Impact

E. I. Mikhnevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Various types of protection are used in order to ensure rigidity in earth dam slopes and dumped rip-rap and precast and cast-in-situ reinforced plates are the most commonly used for this purpose. Durability and reliability of the protections

Адрес для переписки

Михневич Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-71-74
fes@bntu.by

Address for correspondence

Mikhnevich Eduard I.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-71-74
fes@bntu.by

mainly depend on the fact whether protection parameters have been correctly calculated and correspondingly observed during the process of protection creation, the main protection parameters are material diameter of dumped rip-rap and thickness of reinforced plates. Values of protection parameters calculated in accordance to the existing formulae significantly differ among themselves. Some of these formulae are acceptable for small water reservoirs in Belarus and provide actual results only for large water reservoirs where a wave height reaches two metres and even more. A new calculation methodology which is suitable for Belarusian water reservoirs of various size is proposed with the purpose to determine diameter of dumped rip-rap material and thickness of plates for earth dam slope protection in the zone of active wave impact. The methodology has been developed on the basis of the theory pertaining to limit equilibrium of slope shearing and holding forces. While calculating diameter of dumped rip-rap material the following shearing forces have been taken into account: uplift wave pressure depending on wave height; drag force which is formed on the slope due to back sweep of wave; shearing component of protection material gravity force which is dependent on preselected slope ratio. Holding forces are determined with due account of main physical and mechanical properties of dumped rip-rap material: density of particles in water suspension, porosity, internal friction and holding component of protection material gravity force. While developing methodology for calculation of reinforced concrete plate thickness a drag force has not been taken into account because the flow which is formed on the plate surface does not exert an influence on their equilibrium. Bottom slope zone where hydrodynamic pressure is created by bottom velocity has usually a reduced-weight protection in the form of broken stone, gravel and finely broken stone rip-rap. Dependences for determination of dumped rip-rap fineness have been obtained as a result of slope rigidity criterion conversion. The proposed formulae for calculation of earth dam slope protection parameters can be recommended for application in design organizations.

Keywords: earth dam, slope protection, wave impact, dumped rip-rap, reinforced concrete plate, calculation formulae

For citation: Mikhnevich E. I. (2018) Methodology for Calculation of Rigidity in Earth Dams Slopes Protection under Conditions of Wave Impact. *Science and Technique*. 17 (2), 100–105. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-100-105 (in Russian)

Введение

Верховые откосы земляных плотин подвержены разрушающему воздействию ветровых волн, возникающих в акватории водохранилищ. Для предотвращения разрушения откосов применяют различные типы креплений, среди которых наибольшее распространение получили каменная наброска и сборные (реже – монолитные) железобетонные плиты [1–5].

В зоне интенсивного волнового воздействия располагают основное крепление, а ниже него – облегченное. Верхней границей основного крепления обычно является отметка гребня плотины, а при его значительном возвышении над уровнем воды в верхнем бьефе – величина наката волны на откос. Нижняя граница основного крепления назначается на отметке, заглубленной под минимальный уровень верхнего бьефа на величину $2h_b$ (h_b – высота расчетной волны) [4, 5]. Расчетные параметры волн определяют в зависимости от скорости ветра, длины разгона волны, глубины водохранилища в соответствии с ТКП 45-3.04-170–2009 [6].

Для определения диаметра камня наброски и толщины плит крепления откосов предложены различные экспериментальные зависимости [4–8]. Значения параметров креплений, определяемые по этим зависимостям, существ-

венно различаются и не всегда пригодны для малых водохранилищ Беларуси. Поэтому представляется актуальной разработка новой, пригодной для водохранилищ различных размеров методики расчета параметров креплений откосов на основе теории предельного равновесия.

Существующие формулы для расчета устойчивости креплений откосов

Для определения диаметра камня, укладываемого на откосы в виде наброски или мощения, рекомендуются зависимости из [1, 2, 4, 7].

Необходимая масса камня M , кг, для крепления в виде наброски определяется по зависимости

$$M = \frac{0,025\rho_k h_b^2 \lambda}{\left(\frac{\rho_k}{\rho_b} - 1\right)^3 \sqrt{1 + m^3}}, \quad (1)$$

где ρ_k , ρ_b – плотность камня и воды, кг/м^3 ; h_b , λ – высота и длина расчетной волны, м; m – коэффициент заложения откоса.

Расчетный диаметр камня D , м, вычисляется по формуле

$$D = 3\sqrt{\frac{M}{0,524\rho_k}}. \quad (2)$$

В составе наброски из несортированного камня должно быть по массе не менее 50 % камней с расчетным диаметром D . Толщина крепления наброской из несортированного камня $\delta \geq 3D$, а из сортированного $\delta \geq 2,5D$.

Толщину каменного мощения по слою щебеночной или гравийной подготовки определяют по формуле П. А. Шанкина [1, 2, 4]

$$\delta_m = \frac{1,7h_b \rho_b \sqrt{1+m^2}}{(\rho_k - \rho_b)m(m+2)}. \quad (3)$$

При каменном мощении нужно меньше камня для крепления. Но применяется оно очень редко, так как требует больших затрат ручного труда для его устройства.

В справочнике [7] записана формула (4) для определения расчетного размера камня D , м, приведенного к шару, с целью обеспечения устойчивости наброски из несортированного камня в условиях волнового воздействия на откосы с коэффициентом заложения m в пределах 2–5:

$$D = 1,5ch_b \left(\frac{\sqrt[3]{m_{hb}}}{m} + 0,5 \right) \frac{m+1,8}{1,8m-1} \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma_k - \gamma_a}, \quad (4)$$

где γ_a – удельный вес аэрированной воды, стекающей с наброски в конце отката волны, принимаемый 10 кН/м^3 ; γ_k – удельный вес камня, $\gamma_k = 26,5 \text{ кН/м}^3$; c – гидравлический коэффициент сопротивления, принимается равным 0,2 при диаметре камня более 0,15 м и высоте волны более 0,50 м; m_{hb} – пологость расчетной волны, для водохранилищ $m_{hb} = 7$.

Толщину монолитных железобетонных плит $\delta_{п}$ рекомендуется определять из условия их устойчивости по формуле П. А. Шанкина [4]

$$\delta_{п} = \kappa h_b \sqrt{\frac{\rho_b}{\rho_{п} - \rho_b} \cdot \frac{\lambda}{Bm}}, \quad (5)$$

где κ – коэффициент, принимаемый 0,083 при открытых и 0,110 – при закрытых швах; $\rho_{п}$ – плотность материала плиты, кг/м^3 ; B – длина плиты по нормали к урезу воды, м; h_b , λ – высота и длина расчетной волны, м.

Следует отметить, что формула (5) для малых водохранилищ оказалась непригодной, по-

скольку дает реальные размеры плит только для крупных водохранилищ, где высота волны $h_b > 2$ м. Толщина монолитной плиты $\delta_{п}$, устойчивой к действию противодействия при откате волны, согласно [1, 9] определяется по формуле

$$\delta_{п} = 0,07h_b \frac{\rho_b}{\rho_{п} - \rho_b} \cdot \frac{\sqrt{m^2+1}}{m} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{B}}. \quad (6)$$

Толщину сборных плит определяют по формуле В. С. Шайтана [4, 8, 9]

$$\delta_{п} = 0,6h_{в.ср}^2 \frac{B_{от}^{0,75} \rho_b}{B \cos \alpha (\rho_{п} - 0,3K_{в} \rho_b)}, \quad (7)$$

где $h_{в.ср}$ – средняя высота волны в расчетном шторме, м; $B_{от} = B/h_{в.ср}$ – относительная длина ребра плиты, м; B – длина ребра плиты, нормального урезу воды, м; α – угол наклона откоса к горизонту, при заданном коэффициенте

заложения откоса $m \cos \alpha = \frac{m}{\sqrt{1+m^2}}$; $K_{в}$ – ко-

эффициент полноты погружения плиты в аэрированную водную среду, определяется в зависимости от отношения $B/h_{в.ср}$ по табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента полноты погружения плиты
Values for coefficient on completeness of plate dipping

$B/h_{в.ср}$	1,0	1,2–1,5	2,2–2,8	3,5–4,3	5,0–6,0
$K_{в}$	1,00	0,75	0,67	0,60	0,50

Новые формулы для расчета устойчивости креплений откосов

Исходя из теории предельного равновесия, автором [10] получен критерий устойчивости откоса Π_1 при воздействии волн

$$\Pi_1 = \frac{\rho_1'(mf-1)d}{h + ah_b f \sqrt{1+m^2}}, \quad (8)$$

где $\rho_1' = \rho_1/\rho_b$ – относительная плотность; ρ_1 – плотность грунта во взвешенном водой состоянии, кг/м^3 ; ρ_b – плотность воды, кг/м^3 ; f – коэффициент внутреннего трения грунта; d – расчетный диаметр частиц грунта, м; h – глубина

потока на поверхности откоса при откате волн, m ; a – коэффициент взвешивающего волнового давления, $a = 0,27$ для сплошного крепления [3] и $a = 0,27(1 - n_s)$ для зернистых материалов; n_s – пористость грунта или материала наброски; h_b – высота расчетной волны, m ; m – коэффициент заложения откоса.

Критерий Π_1 может быть использован для получения формул для расчета устойчивости креплений откосов в виде каменной наброски и сборных железобетонных плит.

Принимая в критерии (8) для каменной наброски $\rho'_k = \rho_k / \rho_b$ (ρ_k – плотность камня, $кг/м^3$) и решая этот критерий относительно диаметра камня D , m , в условиях предельного равновесия ($\Pi_1 = 1$), получим (с учетом коэффициента запаса K_3)

$$D = K_3 \frac{h + 0,27(1 - n_s)h_b f \sqrt{1 + m^2}}{(\rho_k / \rho_b)(mf - 1)}, \quad (9)$$

где K_3 – коэффициент запаса, учитывающий неравномерность распределения каменной наброски по откосу, $K_3 = 1,20$ для каменной наброски из несортированного материала, $K_3 = 1,00$ – для каменного мощения; h – средняя глубина воды на поверхности откоса при откате волны, может быть принята $h = 0,5h_b$; n_s – пористость материала наброски; f – коэффициент трения каменной наброски по слою обратного фильтра из щебня ($f = 0,9-1,0$) или из гравия ($f = 0,8-0,9$).

При использовании в качестве крепления железобетонных плит влиянием влекущей силы потока на поверхности плит можно пренебречь, т. е. принять $h = 0$. Учитывая, что для сплошного крепления $a = 0,27$ (формула (8)), выражение для определения толщины плит δ_n будет иметь вид

$$\delta_n = K_3 \frac{0,27h_b f \sqrt{1 + m^2}}{(\rho_n / \rho_b)(mf - 1)}, \quad (10)$$

где K_3 – коэффициент запаса, для сборных плит $K_3 = 1,10$, для монолитных $K_3 = 1,00$.

В табл. 2 приведены результаты сравнения расчетов по существующим (2)–(7) и предлагаемым (9), (10) формулам при следующих

данных: $h_b = 1$ м; $\lambda = 10$ м; $m = 3$; $B = 2$ м; $\rho_k = \rho_n = 2650$ $кг/м^3$; $n_s = 0,38$; $f = 0,9$.

Из табл. 2 видно, что значения диаметра камня наброски, полученные по предлагаемой формуле (9), на 11,5 % больше значений расчета по (4), приведенной в [7], и на 23 % меньше значений, получаемых по (2). Толщина каменного мощения по (9) совпадает со значением по зависимости (3) П. А. Шанкина. Предлагаемая формула (10) для определения толщины сборных железобетонных плит показала удовлетворительное совпадение с (7) В. С. Шайтана. Уравнение (5) П. А. Шанкина и зависимость (6) для определения толщины монолитных плит для крепления откосов плотин малых водохранилищ показали результаты, заниженные примерно в три раза.

Таблица 2

Расчетные параметры креплений
Calculated parameters for bracings

Тип крепления, расчетный параметр, м	Значение параметра по формуле							
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(9)	(10)
Каменная наброска, диаметр камня D	0,32		0,23				0,26	
Каменное мощение, толщина δ_m		0,22					0,22	
Сборные железобетонные плиты, толщина δ_n						0,16		0,17
Монолитные железобетонные плиты, толщина δ_n				0,055	0,048			0,16

Облегченное крепление, располагаемое ниже основного на глубине $H > 2h_b$, обычно выполняют в виде наброски из щебня, гравия или мелкого камня. Крупность материала облегченного крепления определяют из условия его устойчивости под воздействием придонных скоростей v_d , возникающих при волнении [9]. Гидравлическое давление P_b , создаваемое на элемент наброски придонной скоростью при волнении, получено в следующем виде [10]:

$$P_b = \frac{a_0 F \gamma_b v_d^2}{2g}, \quad (11)$$

где v_d – придонная скорость, может быть найдена по формуле [9, 11]

$$v_d = \frac{\pi \bar{h}_b n}{\sqrt{\frac{\pi \lambda}{g} \operatorname{sh} \frac{4\pi H}{\lambda}}}. \quad (12)$$

С учетом сил взвешивания частиц водой и внутреннего трения материала наброски, а также косоподходящего ветрового волнения под углом θ к урезу воды суммарная сдвигающая сила $N_{сд}$ получена в виде

$$N_{сд} = \sqrt{\gamma_1^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25(a_0 F \gamma_b \pi)^2 (h_b n)^4 \cos^2 \theta}{\lambda^2 \operatorname{sh}^2 \frac{4\pi H}{\lambda}}}. \quad (13)$$

Удерживающая сила $N_{уд}$ определяется формулой

$$N_{уд} = \gamma_1 W f \cos \alpha \cos \theta. \quad (14)$$

Приравняв удерживающую и сдвигающую силы и поделив их значения на произведение $F \sin \alpha \cos \theta$, получим уравнение предельного равновесия

$$\gamma_1 d f m = \sqrt{\frac{\gamma_1^2 d^2}{\cos^2 \theta} + \frac{0,25(a_0 \gamma_b \pi)^2 (h_b n)^4 (1+m^2)}{\lambda^2 \operatorname{sh}^2 \frac{4\pi H}{\lambda}}}. \quad (15)$$

Обозначим:

$$\frac{\gamma_1 d}{\cos \theta} = \xi_1;$$

$$\frac{0,5 a_0 \gamma_b \pi (h_b n)^2 \sqrt{1+m^2}}{\lambda \operatorname{sh} \frac{4\pi H}{\lambda}} = \xi_2. \quad (16)$$

Тогда критерий устойчивости откоса Π_2 в зоне устройства облегченного крепления (от $H = 2h_b$ до подошвы откоса) получим в следующем виде:

$$\Pi_2 = \frac{\gamma_1 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}. \quad (17)$$

Принимая в условиях предельного равновесия $\Pi_2 = 1$, находим диаметр D материала наброски в зоне облегченного крепления

$$D = \frac{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}{\gamma_1 f m}. \quad (18)$$

В формулах (11)–(18) приняты следующие обозначения: γ_b, γ_1 – удельный вес воды и грунта во взвешенном водой состоянии, Н/м^3 ; W, F – объем элемента грунта и площадь его проекции на плоскость действия равнодействующей сдвигающей силы, $W/F = d$ (d – диаметр частицы грунта, м); a_0 – коэффициент придонной скорости, по экспериментальным данным, принимается 2,27 [12]; h_b, λ – высота и длина волны 50%-й обеспеченности при шторме с расчетной скоростью ветра, м; n – коэффициент, зависящий от крутизны волны λ/h_b [11] (табл. 3); α, m – угол наклона и коэффициент заложения откоса.

Таблица 3

λ/h_b	8	10	15	20
n	0,60	0,70	0,75	0,80

ВЫВОД

Для расчета параметров креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия на основе теории предельного равновесия разработаны новые формулы по определению диаметра камня наброски и толщины железобетонных плит, пригодные для водохранилищ различных размеров, в том числе малых водохранилищ Беларуси. Формулы учитывают основные нагрузки, создаваемые волновым потоком, и физико-механические свойства материала крепления. Они могут быть рекомендованы к практическому применению в проектных организациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. / под. ред. М. М. Гришина. М.: Высш. шк., 1979. Ч. 1. 615 с.
2. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. / под. ред. Л. Н. Рассказова. М.: Изд-во АСВ, 2011. Ч. 1. 576 с.
3. Алперин, И. Е. Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ / И. Е. Алперин, П. С. Быков, В. Б. Гулевич. М.: Транспорт, 1973. 216 с.

4. Богославчик, П. М. Проектирование и расчет гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: БНТУ, 2003. 363 с.
5. Богославчик, П. М. Гидротехнические сооружения / П. М. Богославчик. 2-е изд., испр. Минск: БНТУ, 2014. 223 с.
6. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП 45-3.04-170-2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2011. 74 с.
7. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / под ред. В. П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.
8. Шайтан, В. С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений / В. С. Шайтан. М.: Стройиздат, 1974. 352 с.
9. Кириенко, И. И. Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет / И. И. Кириенко, Ю. А. Химерик. Киев: Вища шк., 1987. 253 с.
10. Михневич, Э. И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич // Мелиорация. 2016. Т. 78, № 4. С. 18–23.
11. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. 313 с.
12. Михневич, Э. И. Устойчивость русел открытых водотоков / Э. И. Михневич. Минск: Ураджай, 1988. 240 с.
3. Alperin, I. E., Bykov P. S., Gulevich V. B. (1973) *Bank Strengthening of Shipping Canals, Rivers and Water Storage Reservoirs*. Moscow, Transport. 216 (in Russian).
4. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2003) *Engineering and Design of Hydraulic Engineering Installations*. Minsk, Belarusian National Technical University. 363 (in Russian).
5. Bogoslavchik P. M. (2014) *Hydraulic Engineering Installations*. 2nd ed. Minsk, Belarusian National Technical University. 223 (in Russian).
6. ТКП 45-3.04-170-2009 (02250). *Hydraulic Engineering Installations. Rules for Determination of loadings and Impacts (Waves, Ice and Ships)*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2011. 74 (in Russian).
7. Zheleznyakov G. V., Izad-zade Yu. A., Ivanov P. L., Lатыshenkov A. M., Nedriga V. P. (ed.), Obrazovskii A. S., Ratkovich D. Ya., Rozanov N. P., Shaitan V. S., Asarin A. E., Burenkova V. V., Vasil'eva I. A., Dianov V. G., Kaganov G. M., Klein I. S., Kolesnikova T. V., Motinov A. M., Pavilonskii V. M., Pokrovskii G. I., Rozanov N. N., Titova V. I., Berezinskii S. A., Zabavin V. S. (1983) *Hydraulic Engineering Installations: Reference Book for Designer*. Moscow, Stroyizdat Publ. 543 (in Russian).
8. Shaytan V. S. (1974) *Earth Slope Protection of Hydraulic Engineering Installations*. Moscow, Stroyizdat Publ. 352 (in Russian).
9. Kirienko I. I., Khimerik Yu. A. (1987) *Hydraulic Engineering Installations. Engineering and Design*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 253 (in Russian).
10. Mikhnevich E. I., Levkevich V. E. (2016) Stability of Water Reservoir Banks while Forming Profile of Dynamic Balance in Cohesionless Soil. *Melioratsia* [Melioration], 78 (4), 18–23 (in Russian).
11. Kiselev P. G. (ed.), Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Sliiskii S. M. (1974) *Reference Book for Hydraulic Calculations*. Moscow, Energy Publ. 313 (in Russian).
12. Mikhnevich E. I. (1988) *Stability in Water Open Channels*. Minsk, Uradzhay Publ. 240 (in Russian).

Поступила 07.07.2017

Подписана в печать 17.09.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Grishin M. M. (ed.) (1979) *Hydraulic Engineering Installations. Vol. 1*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 615 (in Russian).
2. Rasskazov L. N. (ed.), Orekhov V. G., Pravdivets Yu. P., Vorob'ev G. A., Malakhanov V. V. (2011) *Hydraulic Engineering Installations. Vol. 1*. Moscow, ASV Publ. 576 (in Russian).

Received: 07.07.2017

Accepted: 17.09.2017

Published online: 30.03.2018