

УДК 624.138.9

ГИБКИЕ КРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОТЕКСТИЛЯ

Н. Г. БУГАЙ, А. И. КРИВОНОГ, В. В. КРИВОНОГ, В. Л. ФРИДРИХСОН

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 20.03.2005

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований гибких креплений откосов земляных гидротехнических сооружений с использованием геотекстиля. Рассматриваются расчетные схемы устойчивости гибких креплений из каменной наброски и бетонных блоков, скрепленных гибкими связями, при воздействии ветровых и судовых волн, быстром снижении уровня перед откосом и при воздействии льда. Предложена методика учета сил сцепления при расчете крепления откоса, сложенного малосвязными грунтами. Разработаны временные рекомендации по проектированию и строительству гибкого крепления с использованием геотекстиля.

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень гнучких кріплень укосів земляних гідротехнічних споруд з використанням геотекстилю. Розглянуто розрахункові схеми стійкості гнучких кріплень з кам'яної наброски та бетонних блоків, які скріплені гнучкими зв'язками, під дією вітрових та судових хвиль, швидким зниженням рівня перед укосом і під дією льоду. Запропоновано методику обліку сил зчеплення в розрахунках кріплення укосу, який складено малозв'язними грунтами. Розроблені тимчасові рекомендації на проектування та будівництво гнучкого кріплення з використанням геотекстилю.

The outcomes of theoretical and experimental researches of flexible strengthening of slopes of earthen hydraulic engineering buildings with usage of geotextiles are reduced. The calculated schemas of a stability of flexible strengthening from rock fill and concrete blocks fastened by flexible links are considered at effect of wind and ship waves, fast lowering of a level before a slope and at effect of ice. The method of application of the registration of binding forces is proposed at calculation of strengthening of a slope folded small-connected by grounds. The temporal recommendation on projection and building of flexible strengthening with usage of geotextiles are designed.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим два типа крепления откосов: крепление из каменной наброски и из бетонных блоков, скрепленных гибкими связями, по слою геотекстиля на однородном основании.

Геотекстиль – это нетканый или тканый плоский материал из полимерных волокон, укладываемый по контакту крепления и грунта откоса, выполняет роль обратного фильтра. Он должен обеспечивать контактную устойчивость и отвод воды из водонасыщенного откоса при незначительных фильтрационных сопротивлениях. Кроме того, геотекстиль должен быть прочным и долговечным в любых условиях при эксплуатации гидротехнических сооружений. Под прочностью геотекстиля понимается прочность на разрыв и на продавливание частицами защитного слоя из щебня. Современный геотекстиль обладает значительной прочностью на разрыв и может повысить местную устойчивость закрепленного откоса.

Гибкое крепление откосов характеризуется поверхностной плотностью $\delta_{кр}$ $\gamma_{кр}$, где $\delta_{кр}$ – толщина крепления; $\gamma_{кр}$ – объемная массовая плотность крепления.

Для крепления из каменной наброски

$$\gamma_{кр} = \gamma_o(1 - n), \quad (1)$$

где γ_o – массовая плотность камня; n – пористость каменной наброски.

Для гибкого крепления из бетонных блоков с заполнением пустот щебнем

$$\gamma_{кр} = \gamma_{о.б.}(1 - n_1) + \gamma_{о.щ.}n_1(1 - n_2), \quad (2)$$

где $\gamma_{о.б.}$ – массовая плотность бетона; $\gamma_{о.щ.}$ – массовая плотность щебня; n_1 – пористость собственно бетонного крепления; n_2 – пористость заполнения из щебня.

Если крепление заполнено водой, то с учетом взвешивания элементов крепления в воде $\gamma_{кр.взв.}$ будет:

– для крепления из каменной наброски

$$\gamma_{кр.взв.} = (\gamma_o - \gamma_v)(1 - n), \quad (3)$$

где γ_v – массовая плотность воды;

– для гибкого крепления из бетонных блоков с заполнением пустот щебнем

$$\gamma_{кр.взв.} = \{[\gamma_{о.б.}(1 - n_1) + \gamma_{о.щ.}n_1(1 - n_2)] - \gamma_v\}(1 - n_1n_2). \quad (4)$$

1. РАСЧЕТ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА

Вопрос о местной устойчивости откоса земляных сооружений возникает тогда, когда общая устойчивость откоса обеспечена, но при высачивании фильтрационного потока на откос возможно оплывание, при волновом воздействии – размыв откоса, а при воздействии льда во время ледохода – разрушение откоса. В этих случаях необходимо защищать откос креплением.

Рассмотрим следующие расчетные схемы закрепленного откоса.

– *Расчетная схема 1.* Фильтрация внутрь откоса и из откоса (высота высачивания – $h_{\text{выс}} < 0.3$ м; высота волн $h_{\text{в}} < 0.3$ м; движение льда отсутствует).

– *Расчетная схема 2.* Быстрое понижение уровня воды перед откосом (мгновенный сброс), $h_{\text{выс}} > 0.3$ м.

– *Расчетная схема 3.* Воздействие ветровых и судовых волн (высота волны $h_{\text{в}} \leq 1$ м).

– *Расчетная схема 4.* Воздействие льда.

1.1. Расчетная схема 1. Фильтрация внутрь откоса и из откоса, рис. 1

Для надводного откоса длиной l_1 , шириной 1 м можно записать следующие зависимости (при $\gamma_{\text{кр}}$, кгс/м³):

сдвигающая сила

$$T = G \sin \alpha = l_1 \delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} g \sin \alpha; \quad (5)$$

удерживающая сила

$$fP = fG \cos \alpha = fl_1 \delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} g \cos \alpha, \quad (6)$$

где f – коэффициент трения при сдвиге по контакту геотекстиля и грунта.

Известно [1, 2], что при нагрузках до 100 кПа значение f несколько больше $\text{tg } \varphi$. Это означает, что при нарушении местной устойчивости крепления сдвиг будет происходить по грунту откоса в непосредственной близости от контакта геотекстиля с грунтом откоса. Поэтому считаем, что в зависимости (6) $f = \text{tg } \varphi$ и коэффициент местной устойчивости крепления для надводного и подводного откоса k будет:

$$k = \frac{P \text{tg } \varphi}{T} = m \text{tg } \varphi. \quad (7)$$

Принимая $k = 1.2$, получаем предельное значение $m = 1.2/\text{tg } \varphi$.

При $k \geq 1$ геотекстиль, как и все крепление, не работает на растяжение. Однако в практике

эксплуатации отмечены случаи [3], когда при весеннем оттаивании откосов, сложенных связными грунтами, сползло все крепление верхового откоса. Устойчивость крепления с геотекстилем в этом случае может быть оценена следующим образом. Принимая $\text{tg } \varphi \approx 0$, определяем растягивающее усилие в геотекстиле $T_{\text{р.г.}}$:

$$T_{\text{р.г.}} = T = l_1 \delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} g \sin \alpha. \quad (8)$$

Учитывая, что $l_1 = h_1 / \sin \alpha$, получаем

$$T_{\text{р.г.}} = h_1 \delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} g. \quad (9)$$

В табл. 1 помещены значения $T_{\text{р.г.}}$ для двух типов крепления откосов с геотекстилем, которые нашли практическое применение.

Иногда для увеличения устойчивости крепления на связных грунтах в период весеннего оттаивания грунта откоса крепление укладывают на защитный слой из песка [10].

Как видно из табл.1, растягивающие усилия в геотекстиле могут иметь значительную величину и должны учитываться при выборе геотекстиля.

Для бетонно-блочного крепления с гибкими связями растягивающие усилия будут восприниматься самим креплением. При этом усилие на разрыв будут испытывать гибкие связи, которые должны выдерживать нагрузки при монтаже крепления в виде отдельных полотнищ. Но и для такой конструкции крепления геотекстиль должен подбираться из условия $\text{tg } \varphi \approx 0$, так как в практике строительства отмечены случаи [4], когда гибкие связи разрушались после укладки крепления. Кроме того, срок службы гибких связей из металла не превышает $10 \div 12$ лет.

1.2. Расчетная схема 2. Быстрое понижение уровня воды перед откосом (мгновенный сброс), рис. 2

Уровень воды перед откосом мгновенно снижается на величину $z_{\text{сн}}$. Сброс можно считать мгновенным [5], если скорость снижения уровня $V_{\text{сн}} \geq 10 K_{\text{гр}}$, где $K_{\text{гр}}$ – коэффициент фильтрации грунта откоса. Это может быть при быстром (аварийном или неконтролируемом) опорожнении канала или водоема, при быстром подъеме и спаде уровня в нижнем бьефе ГЭС.

В рассматриваемом случае крепление не затоплено водой. Сдвиг происходит по плоскости, параллельной поверхности откоса на глубине δ_0 . Грунт откоса насыщен водой. Фильтрационный поток силой F на участке длиной $2/3 l$ выходит на поверхность откоса под углом $\beta_{\text{ср}}$.

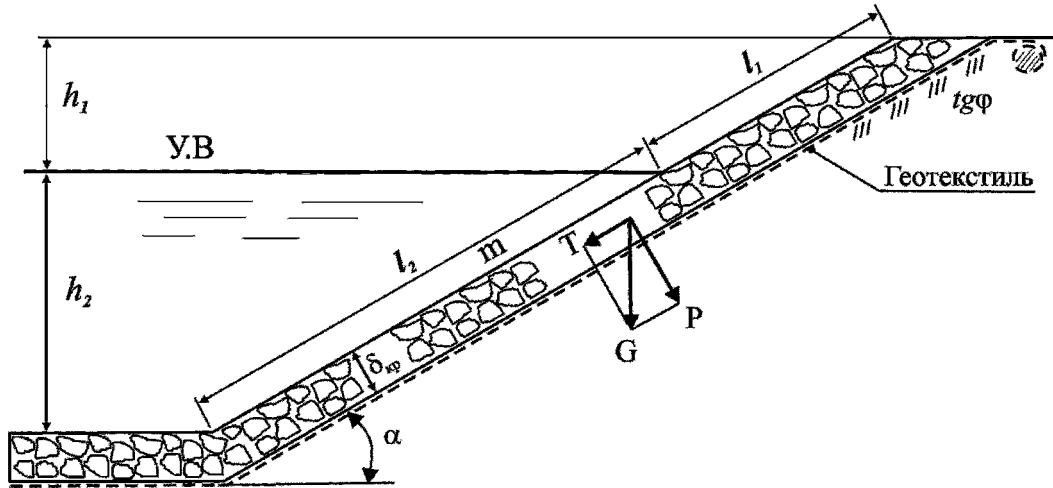


Рис. 1. Расчетная схема 1

Табл. 1. Растягивающее усилие в геотекстиле при $\text{tg } \varphi = 0$

Характеристика крепления	$T_{\text{р.г.}}, H$	
	$h_1 = 1 \text{ м}$	$h_1 = 2 \text{ м}$
Гибкое крепление из каменной наброски $\delta_{\text{кр}} = 0.4 \text{ м}$, $\gamma_{\text{кр}} = 1600 \text{ кгс/м}^3$, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 640 \text{ кгс/м}^2$	6200	12800
Гибкое крепление из бетонных блоков конструкции “Укроргводстроя” $\delta_{\text{кр}} = 0.12 \text{ м}$, $\gamma_{\text{кр}} = 2115 \text{ кгс/м}^3$, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 254 \text{ кгс/м}^2$	2500	5000

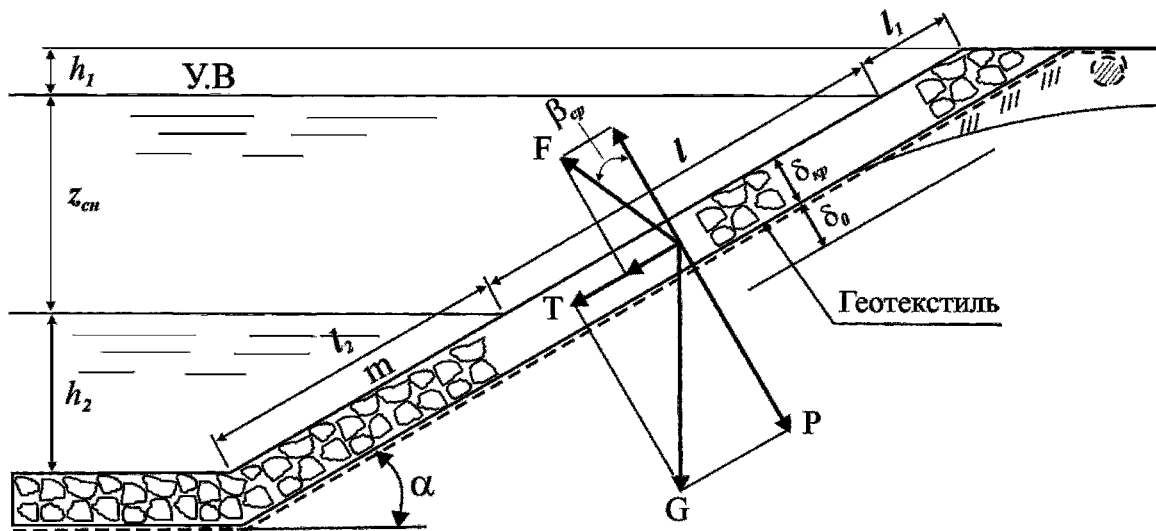


Рис. 2. Расчетная схема крепления при мгновенном понижении уровня воды перед откосом

В этом случае

$$F = \frac{2}{3} l_1 \delta_o \gamma_v g i_{\text{ср}}, \quad (11)$$

$$G = l_1 \delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} g + l_1 \delta_o \gamma_{\text{гр.взв}} g, \quad (10) \text{ где средний градиент фильтрационного потока}$$

$$i_{cp} = \sin \alpha / \sin \beta_{cp}.$$

Сдвигающая сила

$$T = G \sin \alpha + F \sin \beta_{cp}, \quad (12)$$

удерживающая сила

$$\operatorname{tg} \varphi P = \operatorname{tg} \varphi (G \cos \alpha - F \cos \beta_{cp}) + l 1 g C_p, \quad (13)$$

где C_p – расчетный коэффициент сцепления грунта откоса.

Тогда коэффициент устойчивости крепления k будет:

$$k = \frac{\operatorname{tg} \varphi P}{T} = \frac{\operatorname{tg} \varphi (G \cos \alpha - F \cos \beta_{cp})}{G \sin \alpha + F \sin \beta_{cp}} + \frac{l 1 g C_p}{G \sin \alpha + F \sin \beta_{cp}}. \quad (14)$$

При $k \geq 1$ геотекстиль, как и все крепление, не работает на растяжение. При $k < 1$ усилие на разрыв в геотекстиле $T_{p.r.}$ будет

$$T_{p.r.} = (1 - k)(G \sin \alpha + F \sin \beta_{cp}). \quad (15)$$

При практических расчетах значение β_{cp} определяем, используя экспериментальные зависимости $\beta_{cp} = f(m)$, рис. 3. Эти зависимости были получены нами [6] в результате анализа гидродинамических сеток притока к откосу, построенных с использованием метода ЭГДА для плоских моделей. Значение δ_o определялось нами на грунтовых моделях из лессовидной супеси, $\operatorname{tg} \varphi \approx 0.46$. При мгновенном сбросе $\delta_o = (0.07 \div 0.115) z_{сн} / \sin \alpha$, при установившейся фильтрации $\delta_o = (0.07 \div 0.1) h_{выс} / \sin \alpha$. При расчетах принимаем $\delta_o = 0.1 z_{сн} / \sin \alpha$ или $\delta_o = 0.1 h_{выс} / \sin \alpha$.

Значение C_p определяем по экспериментальной зависимости $C/C_p = f(G^*)$, рис. 4, где C – коэффициент сцепления грунта откоса; G^* – давление на поверхность сдвига призмы обрушения,

$$G^* = (\delta_{кр} \gamma_{кр} + \delta_o \gamma_{гр.взв}) \cos \alpha. \quad (16)$$

Зависимость (рис. 4) была получена в результате анализа опытов на грунтовых моделях, проведенных нами ранее при исследовании устойчивости крепления откосов Рогачекского магистрального канала [6]. Детальное обоснование этой зависимости приведено ниже.

1.3. Расчетная схема 3. Воздействие ветровых (рис. 5) и судовых (рис. 6) волн.

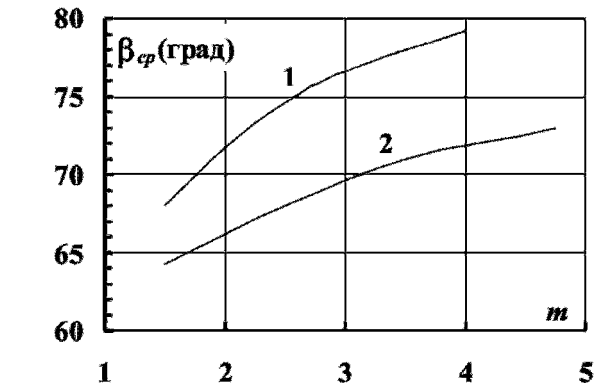


Рис. 3. Экспериментальные зависимости

$$\beta_{cp} = f(m):$$

1 – при мгновенном снижении уровня, 2 – при $h_{выс}$

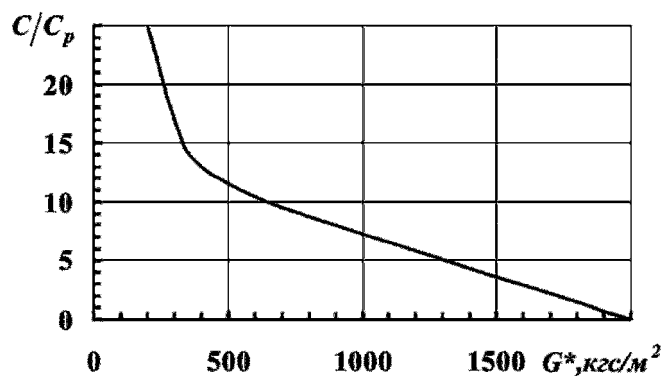


Рис. 4. Экспериментальные зависимости

$$C/C_p = f(G^*)$$

Как известно [7], при обрушении волны на крепление откоса можно выделить три фазы: удар, накат и скат волны. Удар действует очень короткое время и вызывает вынужденные колебания системы крепление – грунт откоса. Частота собственных колебаний такой системы может составлять $10 \div 100$ Гц с амплитудой колебания меньше 1 мм [7]. Собственные колебания затухают очень быстро, но, тем не менее, можно предположить, что в поверхностном слое грунта откоса возможно снижение $\operatorname{tg} \varphi$ до 0. При накате волны на откос гидростатическое давление в зоне наката повышается, а при скате – понижается. Кроме того, при скате волны в зоне активного действия удара волны возникает волновое противодействие. При этом крепление в этой зоне затоплено водой.

1.3.1. Расчетная схема 3. Воздействие ветровых волн, рис. 5 [7].

В этом случае

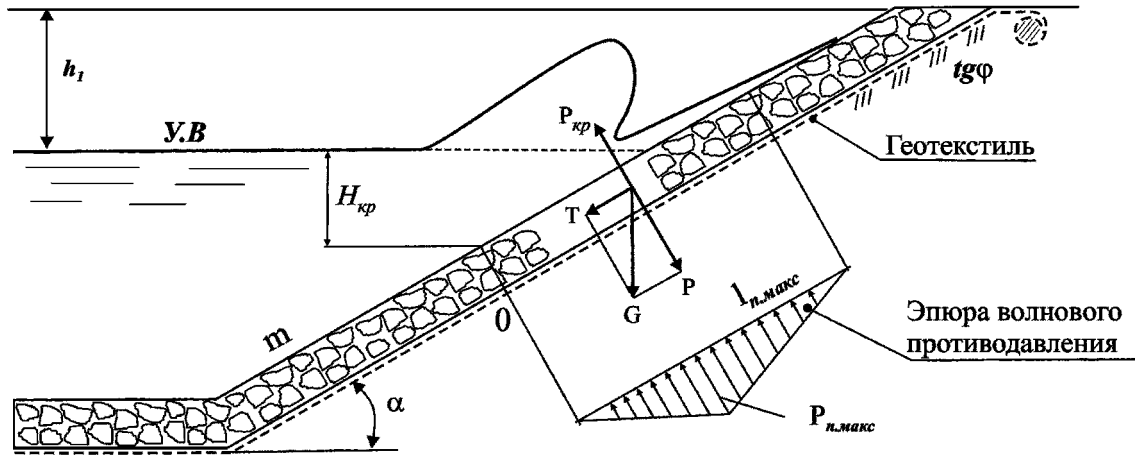


Рис. 5. Расчетная схема крепления при воздействии ветровых волн

$$H_{кр} = h_B \left(0.47 + 0.023 \frac{\lambda}{h_B} \right) \frac{1 + m^2}{m^2}, \quad (17)$$

где h_B – высота волны; λ – длина волны. Для ветровых волн $\lambda/h_B = 7 \div 30$, для судовых волн $\lambda/h_B \geq 5$, кроме того

$$l_{п.макс.} = K_l h_B. \quad (18)$$

$$P_{п.макс.} = K_{п.макс.} h_B \gamma_B. \quad (19)$$

Для сооружений III - IV класса капитальности [7] значение коэффициентов K_l и $K_{п.макс.}$ определяем по табл. 2.

Табл. 2.

m	K_l	$K_{п.макс.}$
1	1.5	0.380
1.5	1.75	0.355
2	2	0.330
2.5	2.25	0.305
3	2.5	0.280
4	3	0.255

Для элемента крепления шириной 1 м, подверженного воздействию волны, можно записать следующие зависимости:

$$P_{п} = \frac{l_{п.макс.} P_{п.макс.} 1 g}{2}, \quad (20)$$

сдвигающая сила

$$T = l_{п.макс.} \delta_{кр} \gamma_{кр.взв.} 1 g \sin \alpha, \quad (21)$$

удерживающая сила

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi (P - P_{п}) &= \operatorname{tg} \varphi (l_{п.макс.} 1 \delta_{кр} \times \\ &\times \gamma_{кр.взв.} g \cos \alpha - \frac{l_{п.макс.} P_{п.макс.} 1 g}{2}). \end{aligned} \quad (22)$$

Тогда коэффициент устойчивости крепления k будет

$$k = \frac{\operatorname{tg} \varphi (P - P_{п})}{T} = m \operatorname{tg} \varphi - \frac{\operatorname{tg} \varphi P_{п.макс.} \sqrt{1 + m^2}}{2 \delta_{кр} \gamma_{кр.взв.}}. \quad (23)$$

При $k \geq 1$ геотекстиль, как и все крепления, не работает на растяжение. При $k < 1$ растягивающее усилие в геотекстиле $T_{р.г.}$ будет

$$\begin{aligned} T_{р.г.} &= (1 - k) T = \\ &= \frac{(1 - k) l_{п.макс.} 1 \delta_{кр} \gamma_{кр.взв.} g}{\sqrt{1 + m^2}}. \end{aligned} \quad (24)$$

При условии $P = P_{п}$ можно определить допустимую минимальную толщину крепления $[\delta_{кр}]$ с учетом коэффициента запаса k_3 :

$$[\delta_{кр}] = k_3 \frac{K_{п.макс.} h_B \gamma_B \sqrt{1 + m^2}}{2 \gamma_{кр.взв.} m}. \quad (25)$$

Например, для крепления из каменной наброски $\gamma_{кр} = 1600 \text{ кгс/м}^3$, $\gamma_{кр.взв.} = 990 \text{ кгс/м}^3$ и для бетонно-блочного крепления конструкции Укроргводстроя $\gamma_{кр} = 2150 \text{ кгс/м}^3$, $\gamma_{кр.взв.} = 990 \text{ кгс/м}^3$ при $k_3 = 1.2$ получаем данные, приведенные в табл. 3.

1.3.2. Воздействие судовых волн, рис. 6 [12]

Табл. 3.

m	h_b , М	$[\delta_{кр}]$, М
2	0.5	0.11
2	1.0	0.22
2	1.5	0.33
2.5	0.5	0.10
2.5	1.0	0.20
2.5	1.5	0.30
3	0.5	0.09
3	1.0	0.18
3	1.5	0.27
4	0.5	0.08
4	1.0	0.16
4	1.5	0.24

Табл. 4.

m	h_c , М	$H_{кр}$, М	$[\delta_{кр}]$, М
2	0.3	0.22	0.05
2	0.5	0.36	0.09
2	1.0	0.73	0.18
2.5	0.3	0.20	0.04
2.5	0.5	0.34	0.07
2.5	1.0	0.68	0.14
3	0.3	0.19	0.02
3	0.5	0.33	0.06
3	1.0	0.65	0.13
4	0.3	0.19	0.02
4	0.5	0.31	0.04
4	1.0	0.62	0.08

На рис. 6 $z_1 = 0.2h_c$, $z_2 = 0.5h_c$, $z_3 = H_{кр}$, $P_1 = 0$, $P_2 = P_3 = 0.5\gamma_b g h_c$, где h_c – высота судовой волны; γ_b – плотность воды;

$$H_{кр} = h_c \times \left(0.47 + 0.023 \frac{\lambda}{h_c} \right) \frac{1 + m^2}{m^2},$$

λ – длина волны.
Сдвигающая сила

$$T = G \sin \alpha = (z_3 - z_1) 1 \delta_{кр} \gamma_{кр.взв} g, \quad (26)$$

удерживающая сила

$$(P - P_{пр}) \operatorname{tg} \varphi, \quad (27)$$

где

$$P = G \cos \alpha = \frac{z_3 - z_1}{\sin \alpha} 1 \delta_{кр} \gamma_{кр.взв} g \times \cos \alpha = (z_3 - z_1) m 1 \delta_{кр} \gamma_{кр.взв} g, \quad (28)$$

$$P_{пр} = 1 \frac{1}{2} \gamma_b g h_c (H_{кр} - 0.35h_c), \quad (29)$$

$$k = \frac{(P - P_{пр}) \operatorname{tg} \varphi}{T}, \quad (30)$$

$$T_{р.г.} = (1 - k) T. \quad (31)$$

При $P = P_{пр}$ крепление находится в равновесии. Принимая коэффициент запаса 1.2 и учитывая значение P и $P_{пр}$, получим зависимость для определения допустимого значения $[\delta_{кр}]$:

$$[\delta_{кр}] \geq \frac{\gamma_b h_c (H_{кр} - 0.35h_c)}{2m \gamma_{кр.взв} (H_{кр} - 0.2h_c)}. \quad (32)$$

В табл. 4 приведены результаты определения $[\delta_{кр}]$ для крепления из каменной наброски ($\delta_{кр} \gamma_{кр} = 640 \text{ кгс/м}^2$) и бетонно-блочного крепления конструкции Укроргводстроя ($\delta_{кр} \gamma_{кр} = 254 \text{ кгс/м}^2$), для которых $\gamma_{кр.взв} = 900 \text{ кгс/м}^3$.

Методика расчета, изложенная выше, была проверена на примерах работы креплений откосов с использованием геотекстиля Среднегерманского судоходного канала [8]. Результаты приведены ниже.

1.4. Расчетная схема 4. Воздействие льда, рис. 7

При расчете динамического воздействия льда на крепление следует иметь в виду следующее [9].

Для каскада водохранилищ на р. Днепр и ее притоков ледостав составляет 100 ÷ 110 дней для Киевского и 60 ÷ 70 дней для Днепровского водохранилищ. Максимальная толщина льда составляет соответственно 40 см и 25 ÷ 30 см. Вскрытие рек происходит в конце марта при уровнях, близких к межнным, максимум паводка – в конце апреля, начале мая. Зимы на Украине мягкие, с частыми оттепелями, что приводит к снижению прочностных свойств льда, колебаниям уровней в реках и водоемах, образованию трещин на ледовом поле вдоль берега. Учитывая это, из всех известных видов воздействия льда на крепление наиболее опасным является удар отдельных льдин по креплению в период ледохода.

Динамическое воздействие льда на крепление (рис. 7) при ледоходе, когда лед движется отдельными льдинами, можно определить по следующим зависимостям [10]:

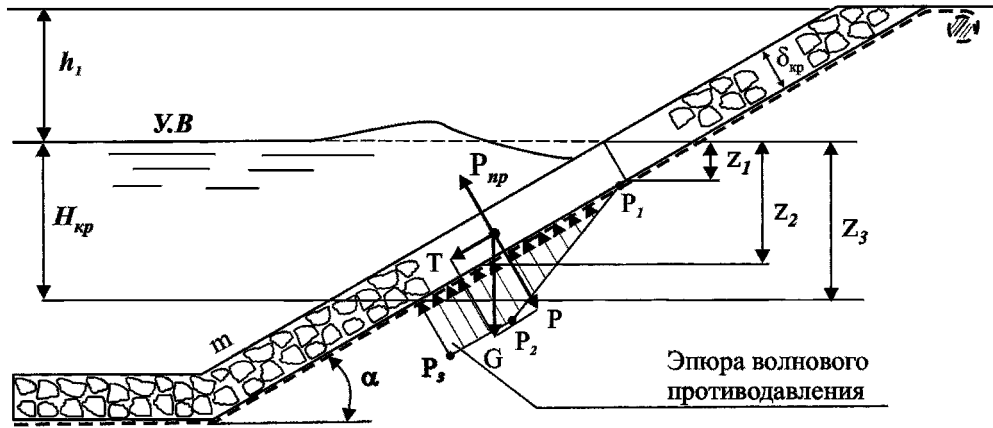


Рис. 6. Расчетная схема крепления при воздействии судовых волн

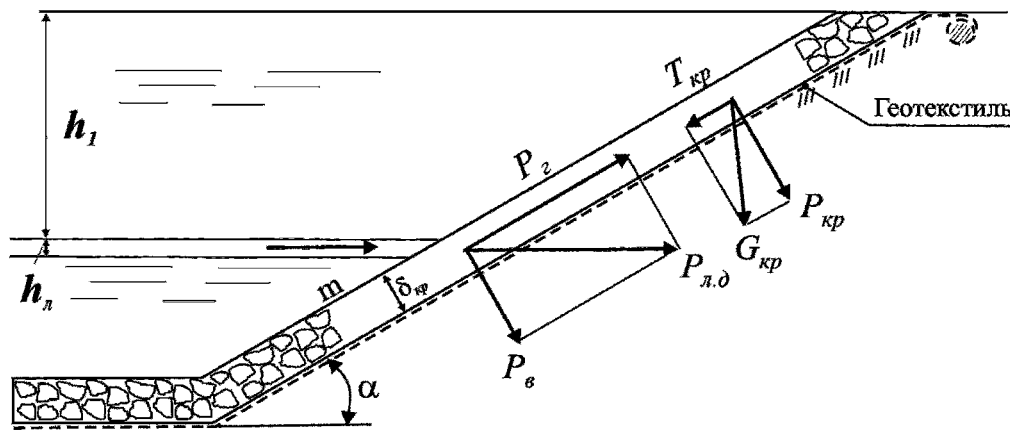


Рис. 7. Расчетная схема крепления при воздействии льда

на вертикальную стенку при направлении движения льда под углом $\beta = 80^\circ \div 90^\circ$ к фронту сооружения

$$P_{л.д} = k_1 V h_{л} \sqrt{\omega}, \quad (33)$$

на откосное крепление при $\beta = 80^\circ \div 90^\circ$

$$P_{в} = k_1 V h_{л} \sqrt{\omega} \sin \alpha, \quad (34)$$

$$P_{г} = k_1 V h_{л} \sqrt{\omega} \cos \alpha, \quad (35)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от предела прочности льда при раздроблении R_p (при $R_p = 1$ МПа, $k_1 = 4.3 \cdot 10^4$ Н·с/м³ – начало паводка, при $R_p = 0.5$ МПа, $k_1 = 3 \cdot 10^4$ Н·с/м³, при $R_p = 0.3$ МПа, $k_1 = 2.3 \cdot 10^4$ Н·с/м³ – конец паводка). Величина $P_{л.д}$ не может быть больше, чем сила при разрушении льда $P_{л.д} \leq 0.5 R_p l h_{л}$; V –

скорость движения льда в м/с, принимается по натурным наблюдениям. При отсутствии таких данных, принимается равной средней скорости течения реки, а на водохранилищах – скорости ветрового нагона, но не более 0.6 м/с. Для равнинных рек Украины $V = 0.5 \div 1.5$ м/с [9]; $h_{л}$ – толщина льда, принимается 0.8 от наибольшей за зимний период; $\omega = lb$ (здесь l – длина льдин по направлению потока, b – ширина льдины). Длина l принимается не более трехкратной ширины льдины.

Учитывая значения ω и $\sin \alpha = 1/\sqrt{1+m^2}$, $\cos \alpha = m/\sqrt{1+m^2}$, для полосы крепления шириной 1 м можно записать:

$$P'_{в} = \frac{P_{в}}{l} = k_1 V h_{л} \sqrt{\frac{b}{l}} \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}, \quad (36)$$

$$P'_{г} = \frac{P_{г}}{l} = k_1 V h_{л} \sqrt{\frac{b}{l}} \frac{m}{\sqrt{1+m^2}}. \quad (37)$$

Для рассматриваемой схемы расчета (рис. 7):
сдвигающая сила

$$T = P'_r - T_{кр} = k_1 V h_{л} \sqrt{\frac{b}{l}} \frac{m}{\sqrt{1+m^2}} - h_1 \delta_{кр} \gamma_{кр} 1 g, \quad (38)$$

удерживающая сила

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi P_{кр} &= \operatorname{tg} \varphi G_{кр} \cos \alpha = \\ &= m \operatorname{tg} \varphi h_1 \delta_{кр} \gamma_{кр} 1 g, \end{aligned} \quad (39)$$

где $\gamma_{кр}$ в кгс/м³.

Коэффициент устойчивости крепления

$$k = \frac{\operatorname{tg} \varphi P_{кр}}{T}. \quad (40)$$

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО УСИЛИЯ НА РАЗРЫВ ГЕОТЕКСТИЛЯ

Приведенные выше решения позволяют определить допустимое усилие на разрыв геотекстиля $[T]$ следующим образом.

2.1. Расчетная схема 1. Фильтрация внутри откоса и из откоса, рис. 1

Коэффициент местной устойчивости крепления шириной 1 м с учетом работы геотекстиля на растяжение будет

$$k = \frac{\operatorname{tg} \varphi P + [T] 1}{T}.$$

Принимая коэффициент запаса $k_3 = 1.2$, получим:

для надводного откоса

$$[T] = h_1 \delta_{кр} \gamma_{кр} 1 g (1.2 - m \operatorname{tg} \varphi), \quad (41)$$

для подводного откоса

$$[T] = h_2 \delta_{кр} \gamma_{кр.взв.} 1 g (1.2 - m \operatorname{tg} \varphi), \quad (42)$$

где $\gamma_{кр}$ и $\gamma_{кр.взв.}$ в кгс/м³.

2.2. Расчетная схема 2. Быстрое понижение уровня воды перед откосом (мгновенный сброс), рис. 2

С учетом работы геотекстиля на растяжение

$$\begin{aligned} k &= \frac{\operatorname{tg} \varphi (G \cos \alpha - F \cos \beta_{ср})}{G \sin \alpha + F \sin \beta_{ср}} + \\ &+ \frac{l 1 g C_p}{G \sin \alpha + F \sin \beta_{ср}} + \\ &+ \frac{[T] 1}{G \sin \alpha + F \sin \beta_{ср}}. \end{aligned} \quad (43)$$

При $k_3 = 1.2$ получим

$$\begin{aligned} [T] &= 1.2(G \sin \alpha + F \sin \beta_{ср}) - \\ &- \operatorname{tg} \varphi (G \sin \alpha - F \cos \beta_{ср}) - \\ &- l 1 g C_p, \end{aligned} \quad (44)$$

где G по (10), F по (11), C_p в кгс/м².

2.3. Расчетная схема 3. Воздействие ветровых волн, рис. 5

С учетом работы геотекстиля на растяжение

$$k = \frac{\operatorname{tg} \varphi (P - P_{п}) + [T] 1}{T}, \quad (45)$$

где $\operatorname{tg} \varphi (P - P_{п})$ определяется по выражению (22), T – по (21), $P_{п}$ – по (20).

При $k_3 = 1.2$ получим

$$[T] = 1.2 T - \operatorname{tg} \varphi (P - P_{п}). \quad (46)$$

2.4. Расчетная схема 4. Воздействие льда, рис. 7

С учетом работы геотекстиля на растяжение

$$k = \frac{\operatorname{tg} \varphi P_{кр} + [T] 1}{T}. \quad (47)$$

При $k_3 = 1.2$ получим

$$[T] = 1.2 T - \operatorname{tg} \varphi P_{кр}, \quad (48)$$

где T находим по выражению (38), $\operatorname{tg} \varphi P_{кр}$ – по (39).

Определив $[T]$, выбираем геотекстиль. При этом, усилие на разрыв геотекстиля должно быть в четыре раза больше, чем $[T]$, при длительном приложении нагрузки [11] и в два раза – при кратковременном приложении нагрузки.

Анализ результатов расчетов $[T]$ для гибких креплений из каменной наброски и бетонных блоков показал следующее.

Для крепления из каменной наброски при $\delta_{кр} \gamma_{кр} = 640$ кгс/м² и $m = 3 \div 4$ наибольшие значения $[T]$ будут при мгновенном снижении уровня воды перед откосом и при волновом воздействии и могут составить 1140 Н/м при $z_{сн} = 2$ м

и 1050 Н/м при высоте волны 1 м при $\text{tg } \varphi = 0.46$. При $\text{tg } \varphi = 0.7$ геотекстиль практически не работает. Принимая, что мгновенный сброс уровня, воздействие судовых волн и удар льдин можно рассматривать как кратковременное приложение нагрузки, а ветровое волнение (на водохранилищах и больших водоемах) – как длительное приложение нагрузки, получим, что геотекстиль должен иметь усилие на разрыв $1040 \times 4 = 4160$ Н/м.

Для крепления из бетонных блоков конструкции Укроргводстроя толщиной $\delta_{\text{кр}} = 0.12$ м, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 254$ кгс/м² при $m = 3$ и $\text{tg } \varphi = 0.46$ максимальные значения $[T]$ будут: при ледовом воздействии – 7000 Н/м, при $z_{\text{сн}} = 2$ м – 4200 Н/м, при $h_{\text{в}} = 1$ м – 1900 Н/м. Тогда максимальное усилие на разрыв геотекстиля составит соответственно 14000 Н/м, 8400 Н/м, 3800 Н/м и 7600 Н/м (при ветровом волнении). Следует также отметить следующее. Бетонно-блочное крепление при $\delta_{\text{кр}} = 0.12$ м и $h_{\text{в}} = 1$ м может отрываться от основания, так как $\delta_{\text{кр}} < [\delta_{\text{кр}}] = 0.18$ м. Ячейки между блоками заполнены щебнем $20 \div 40$ мм, который может быть вымыт при ударе волны. Считаем, что такое крепление может работать нормально при $h_{\text{в}} \leq 0.5$ м и при отсутствии движения льда на водоеме при весеннем снеготаянии. Окончательные выводы о воздействии льда можно будет сделать после проведения натурных исследований на опытных участках крепления.

Для бетонного крепления из бетонных блоков толщиной $\delta_{\text{кр}} = 0.2$ м, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 423$ кгс/м² максимальное значение $[T]$ при $m = 3$ и $h_{\text{в}} = 1$ м составляет при $\text{tg } \varphi = 0.46$ – 4400 Н/м и при $\text{tg } \varphi = 0.7$ – 3400 Н/м. Тогда усилие на разрыв для геотекстиля должно быть соответственно 8800 Н/м и 6800 Н/м. Считаем, что конструкцию крепления следует изменить следующим образом: просветность собственно бетонного крепления уменьшить до $0.17 \div 0.2$; блокам придать наклон так, чтобы большая вертикальная грань 50×20 см блока составляла угол с горизонтом $\sim 70^\circ$. Зарубежный опыт показывает, что такое мероприятие существенно увеличивает устойчивость щебня в ячейках между блоками при волновом воздействии. Такую конструкцию крепления следует проверить на опытном участке.

3. ВЛИЯНИЕ СИЛ СЦЕПЛЕНИЯ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРЕПЛЕНИЯ ПРИ МГНОВЕННОМ ПОНИЖЕНИИ УРОВНЯ ВОДЫ ПЕРЕД ОТКОСОМ

Исследования, проведенные нами ранее [5] для

лессовидной супеси, показали, что влияние сил сцепления на коэффициент запаса устойчивости крепления при мгновенном сбросе значительное и зависит от плотности скелета грунта $\gamma_{\text{ск}}$, $\text{tg } \varphi$ и C грунта, а также от поверхностной плотности крепления $\gamma_{\text{кр}} \delta_{\text{кр}}$.

Исследования проведены на грунтовых моделях пригруженных откосов в фильтрационном лотке, рис. 8. В качестве пригрузки использовался щебень по слою крупнозернистого песка ($d = 0.5 \div 2$ мм) или слою из стекломатов толщиной ~ 1 см.

Методика исследований. В фильтрационном лотке шириной 60 см, высотой 110 см и длиной 6 м устраивалась грунтовая модель откоса. Грунт укладывался слоями толщиной $5 \div 10$ см, которые равномерно уплотнялись. В процессе укладки грунта в модель отбирались пробы для определения плотности, $\text{tg } \varphi$ и коэффициент сцепления C . Вдоль вертикальной торцевой стенки торцевой модели укладывался щебень $d = 1 \div 15$ мм, в слое щебня поддерживался постоянный горизонт воды в течение всего опыта. После замачивания модели и наполнения канала водой максимальный горизонт 70 см выдерживался $1 \div 2$ суток и затем проводился практически мгновенный сброс (в течение 3 минут). После сброса воды из канала последний выдерживался сутки опорожненным и затем цикл наполнения и сброса воды повторялся несколько раз. После сброса фиксировалась деформация откоса по подвижкам контрольных марок на поверхности крепления и сигнальных столбиков из цветного грунта, заложенных у прозрачной стенки лотка. По смещению марок строились эпюры деформации откоса, по смещению сигнальных столбиков – кривые скольжения.

Данные о фильтрационном потоке в откосе были получены на основе моделирования на ЭГДА для случая мгновенной сработки уровня воды в канале [6]. Гидродинамические сетки были обработаны, в результате чего получены средние значения угла $\beta_{\text{ср}}$ для каждого опыта.

При проведении опытов было отмечено, что деформации откосов происходят в три стадии.

Первая стадия – откос не деформируется, коэффициент запаса местной устойчивости откоса $k_{\text{з,оп}} > 1$.

Вторая стадия – откос деформируется незначительно, деформации затухающие $k_{\text{з,оп}} \approx 1$.

Третья стадия – деформации откоса прогрессирующие, через некоторое время откос оплывает, $k_{\text{з,оп}} < 1$.

Из результатов опытов, приведенных в табл. 5, видно, что δ_o/l мало изменяется и может

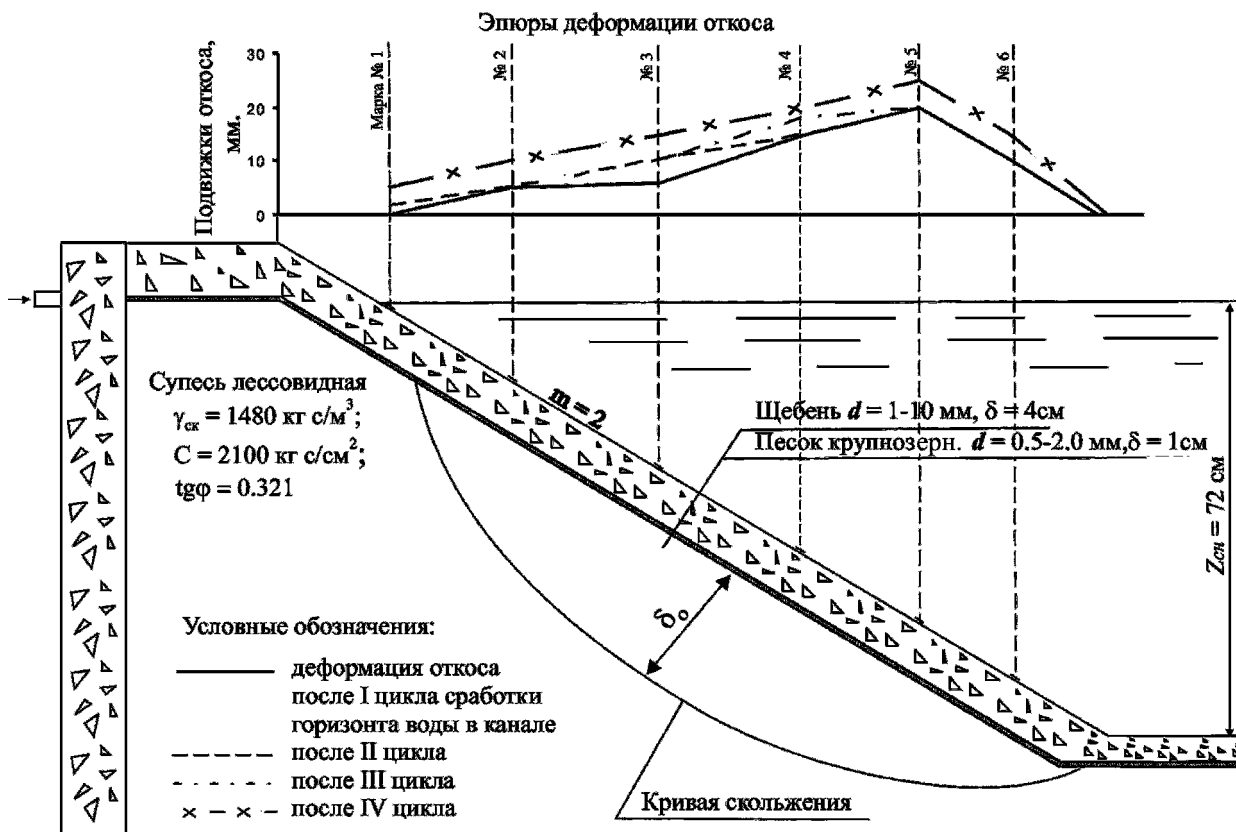


Рис. 8. Схема разрушения модели при мгновенной сработке горизонта воды в канале.

быть принято 0.115. Тогда, учитывая, что $l = z_{ch} / \sin \alpha = z_{ch} \sqrt{1 + m^2}$, получим $\delta_o = 0.115 z_{ch} \times \sqrt{1 + m^2}$, где δ_o – толщина призмы сдвига.

Коэффициент запаса местной устойчивости откоса без учета сил сцепления будет

$$k_3 = \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{T}, \quad (49)$$

с учетом сил сцепления $k_{3.c}$

$$k_{3.c} = \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{T} + \frac{l 1 g C_p}{T}. \quad (50)$$

Из выражения (50) видно, что учет сил сцепления приводит к увеличению коэффициента запаса на $\Delta k_{3.c}$:

$$\Delta k_{3.c} = \frac{l 1 g C_p}{T}, \quad (51)$$

$$\Delta k_{3.c} = \frac{C_p}{A}, \quad (52)$$

где

$$A = \frac{\delta_{кр} \gamma_{кр}}{\sqrt{1 + m^2}} + \frac{0.115 z_{ch} \gamma_{гр.взв}}{\sqrt{1 + m^2}} + \frac{0.115 z_{ch} \gamma_{в}}{\sin \beta_{cp}}.$$

В табл. 5 приведены значения коэффициента $a = k_{3.оп} / k_3$, который во всех опытах больше 1, что говорит о значительном влиянии сил сцепления на устойчивость откоса.

Значение $\Delta k_{3.c}$ по результатам опытов определялось по зависимости

$$\Delta k_{3.c} = k_3 (a - 1). \quad (53)$$

Зависимость (52) при известных значениях $\Delta k_{3.c}$ позволяет найти действительное значение коэффициента сцепления, который имел место в опыте. В табл. 5 этот коэффициент сцепления обозначен C_p и является расчетным.

По результатам опытов построены экспериментальные зависимости $a = f(\delta_{кр} \gamma_{кр})$, рис. 9, и $C/C_p = f(\sigma^*)$, рис. 10. Здесь σ^* – нормальная составляющая давления по плоскости сдвига после мгновенного сброса,

$$\sigma^* = (\delta_{кр} \gamma_{кр} + \delta_o \gamma_{гр.взв}) \cos \alpha. \quad (54)$$

Из рис. 9 и 10 видно, что связность грунта действительно увеличивает коэффициент запаса ме-

Табл. 5. Мгновенный сброс, $z_{сн} = 0.72$ см. Крепление – щебень.

Параметры	№№ опытов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m	2.0	3.3	2.75	2.3	2.3	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	2.0	1.5
$\gamma_{гр.взв},$ кгс/м ³	920	910	910	910	910	910	970	910	970	970	970	970
$\gamma_{ск},$ кгс/м ³	1480	1460	1460	1460	1460	1460	1550	1460	1550	1550	1550	1550
$tg \varphi$	0.321	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.340	0.316	0.340	0.340	0.340	0.340
$C,$ кгс/м ²	2100	1900	1900	1900	1900	1900	2600	1900	2600	2600	2600	2600
$\delta_{кр} \gamma_{кр},$ кгс/м ²	75	52	135	264	100	300	150	150	≈ 75	225	105	225
$\beta_{ср}, ^\circ$	72°	78°	75°	74°	74°	72°	75°	72°	75°	72°	72°	68°
$\delta_o,$ м	0.180	0.277	0.235	0.202	0.202	0.180	0.220	0.180	0.222	0.180	0.180	0.145
$l = \frac{z_{сн}}{\sin \alpha}$	1.57	2.42	2.05	1.76	1.76	1.57	1.89	1.57	1.89	1.57	1.57	1.26
δ_o/l	0.115	0.114	0.114	0.114	0.114	0.119	0.116	0.114	0.117	0.114	0.114	0.115
$k_{3.оп}$	< 1	≈ 1	> 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	> 1	≈ 1	≈ 1
k_3	0.25	0.52	0.49	0.50	0.41	0.41	0.37	0.36	0.32	0.35	0.29	0.34
$\frac{k_{3.оп}}{k_3} = a$	4.00	1.92	2.24	2.00	2.43	2.43	2.70	3.14	3.12	2.86	3.45	2.94
$\Delta k_{3.с}$	0.75	0.48	0.61	0.50	0.59	0.59	0.63	0.77	0.68	0.65	0.71	0.66
$C_p,$ кгс/м ²	113	58	94	109	90	148	105	142	94	141	116	166
C/C_p	18.5	32.7	20.2	17.5	21.0	12.7	24.7	13.4	27.6	18.4	22.4	15.7
$\sigma^*,$ кгс/м ²	117	260	303	388	239	395	310	262	241	336	230	292

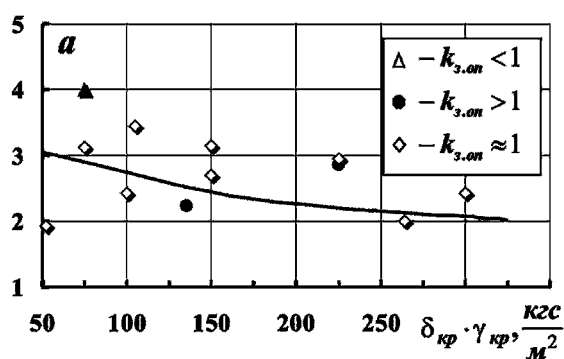


Рис. 9. Зависимость $a = f(\delta_{кр} \gamma_{кр})$ при мгновенном сбросе для откоса, пригруженного щебнем, $z_{сн} = 0.7$ м. Грунт – лессовидная супесь

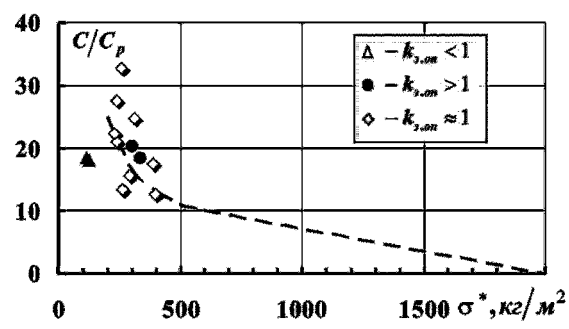


Рис. 10. Экспериментальная зависимость $C/C_p = f(\sigma^*)$ при мгновенном сбросе. Крепление – щебень. Грунт – лессовидная супесь

стой устойчивости для приведенных опытов. Но при этом механизм оплывания грунта откоса под действием фильтрационных сил такой, что только незначительная часть сил сцепления грунта следует учитывать при расчетах. Из рис. 10 видно, что опыты проведены при $\sigma^* < 400$ кгс/м². В то

же время стандартные испытания образцов грунта при определении $tg \varphi$ и C выполнены при $\sigma^* = 2000 \div 50000$ кгс/м², [6]. Поэтому экстраполяция опытных данных произведена так, что $C/C_p = 1$ при $\sigma^* = 2000$ кгс/м².

При расчете гибкого крепления с использованием геотекстиля учет связности грунта производим следующим образом. Определяем k_3 без учета сил сцепления по (49), $k_{3,c}$ с учетом сил сцепления по (50), растягивающее усилие в геотекстиле без учета сил сцепления $T_{p,r}$ и с учетом сил сцепления $T_{p,r,c}$ по следующим зависимостям:

$$T_{p,r} = T - P \operatorname{tg} \varphi, \quad (55)$$

$$T_{p,r,c} = T - (P \operatorname{tg} \varphi + l \, 1 \, g C_p), \quad (56)$$

где

$$P = G \frac{m}{\sqrt{1+m^2}} - F \cos \beta_{cp}, \quad (57)$$

$$G = z_{ch} \, 1 \, g \sqrt{1+m^2} \times \\ \times \left(\delta_{кр} \gamma_{кр} + 0.1 z_{ch} \sqrt{1+m^2} \gamma_{гр.взв} \right), \quad (58)$$

$$F = \frac{2 \cdot 0.1 z_{ch}^2 \, 1 \, \gamma_v \, g \sqrt{1+m^2}}{3 \sin \beta_{cp}}, \quad (59)$$

$$T = \frac{G}{\sqrt{1+m^2}} + F \sin \beta_{cp}. \quad (60)$$

Значение C_p определяем по экспериментальной зависимости, рис. 10, в зависимости от σ^* (54).

Примеры расчета. Определить коэффициент запаса местной устойчивости и растягивающие усилия в геотекстиле для откоса канала, проложенного в лессовидной супеси и закрепленного гибким креплением из каменной наброски ($\delta_{кр} = 0.4$ м, $\gamma_{кр} = 1600$ кгс/м³, $\delta_{кр} \gamma_{кр} = 640$ кгс/м²) и бетонно-блочным креплением конструкции Укроргводстроя ($\delta_{кр} = 0.12$ м, $\gamma_{кр} = 2115$ кгс/м³, $\delta_{кр} \gamma_{кр} = 254$ кгс/м²) по слою геотекстиля при $z_{ch} = 0.5, 1$ и 2 м, $m = 2 \div 4$, $\operatorname{tg} \varphi = 0.46$, $C = 500$ кгс/м², $\gamma_{гр.взв} = 920$ кгс/м³.

В табл. 6 приведены результаты расчетов, в которых было принято $\delta_o = 0.1l = 0.1 z_{ch} \times \sqrt{1+m^2}$, а также приведены результаты определения k_3 и $T_{p,r}$ для случая, когда канал проложен в песке $\operatorname{tg} \varphi = 0.7$.

Из этих данных видно, что силы сцепления грунта откоса увеличивают коэффициент запаса местной устойчивости крепления.

При $m = 3 \div 4$, $\operatorname{tg} \varphi = 0.46 \div 0.7$ и $z_{ch} \leq 2$ м для рассмотренных конструкций креплений геотекстиль не работает на растяжение. При $m < 3$ и $z_{ch} > 2$ м влияние фильтрационных сил быстро возрастает и требует специального расчета при выборе геотекстиля. При этом усилие на разрыв

геотекстиля должно быть не менее чем в 2 раза больше, чем $T_{p,r}$ для несвязных грунтов откоса или $T_{p,r,c}$ для малосвязных грунтов.

4. ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИБКИХ КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Опыт строительства креплений откосов земляных сооружений с использованием фильтров из волокнистых материалов имеет 40-летнюю историю. В странах СНГ было построено несколько объектов с использованием матов из стекловолокон под монолитным бетонным креплением [13], которые хорошо работают до сих пор. В зарубежных странах – США, Англии, Индии, Франции, Германии и Нидерландах – использовались тканые и нетканые рулонные материалы при строительстве креплений откосов, в основном, судоходных каналов, защитных дамб и берегов рек. Эти материалы получили общее название геотекстиль. В качестве пригрузки использовались каменная наброска и различные конструкции бетонно-блочных креплений, скрепленных гибкими связями или связанные с геотекстилем. В табл. 7 и 8 приведены основные результаты натурных и некоторых лабораторных испытаний гибких креплений с использованием геотекстиля [8, 14 – 17]. Анализируя эти результаты, можно сделать следующие выводы.

1. При защите откосов судоходных каналов, защитных дамб и берегов судоходных рек, когда возможно воздействие волн высотой до 1 м, можно использовать крепление из каменной наброски или бетонных блоков, скрепленных гибкими связями, по слою геотекстиля. Пригрузка из камня должна быть толщиной $\delta \geq 0.4$ м, размер камня $15 \div 25$ см, масса камня $5 \div 40$ кг. Бетонно-блочное крепление должно иметь $\delta_{кр} \gamma_{кр} \geq 220$ кгс/м³ с заполнением пустот между блоками щебнем.

2. Геотекстиль должен быть достаточно прочным на разрыв, иметь высокую водопроницаемость и должен быть защищен прочной сеткой с ячейками не более $10 \div 15$ мм. В качестве геотекстиля лучше использовать нетканый фильтр толщиной $\delta \geq 4$ мм при $h \leq 0.5$ м и $\delta \geq 6$ мм при $h = 0.5 \div 1$ м.

Коэффициент фильтрации фильтра должен быть не менее 200 м/сут, так как возможна кольматация фильтра и снижение коэффициента фильтрации до десяти раз.

3. Крепление откосов должно быть доведено до дна канала или реки, так как разрушение крепе-

Табл 6.

Параметры	$m = 2$			$m = 2.5$			$m = 3$			$m = 4$		
	$z_{\text{сн}}, \text{М}$			$z_{\text{сн}}, \text{М}$			$z_{\text{сн}}, \text{М}$			$z_{\text{сн}}, \text{М}$		
	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
Крепление – каменная наброска $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 640 \text{ кгс/м}^2$ по слою геотекстиля												
$\text{tg } \varphi = 0.46, C = 500 \text{ кгс/м}^2$												
$G \cdot 10^3, \text{Н}$	8.15	18.6	46.3	10	23.6	60.2	12.2	28.8	75.6	16.7	41.1	311
$F \cdot 10^3, \text{Н}$	0.39	1.54	6.15	0.46	1.84	7.35	0.53	2.12	8.5	0.69	2.75	11.0
$P \cdot 10^3, \text{Н}$	7.14	16.0	39.23	9.13	21.3	53.5	11.48	26.8	70	16.1	39.5	108
$T \cdot 10^3, \text{Н}$	4	9.76	26.55	4.14	10.45	29.3	4.37	11.15	32.2	4.77	12.7	38.0
$\beta_{\text{ср}}, ^\circ$	72°	72°	72°	74°	74°	74°	77°	77°	77°	79°	79°	79°
$\sigma^*, \text{кгс/м}^2$	660	750	940	705	820	1050	740	880	1150	805	1000	1360
$\delta_o, \text{М}$	0.112	0.224	0.448	0.135	0.270	0.540	0.158	0.316	0.632	0.206	0.412	0.824
C/C_p	10.0	9.0	7.5	10.0	9.0	7.0	9.0	8.0	6.0	8.9	7.5	5.0
$C_p, \text{кгс/м}^2$	50	55	66	50	55	71	55	62	83	56	66	100
k_3	0.82	0.75	0.68	1.02	0.94	0.84	1.21	1.10	1.00	1.55	1.43	1.30
$l \text{ l g } C_p, \text{Н}$	550	1220	2940	665	1470	4050	855	1920	3580	1130	2700	8100
$k_{3,c}$	0.96	0.86	0.79	1.18	1.08	0.98	1.40	1.27	1.11	1.79	1.65	1.51
$T_{\text{п.г}}, \text{Н}$	720	2440	850	–	640	4700	–	–	–	–	–	–
$T_{\text{п.г.с}}, \text{Н}$	160	1360	5600	–	–	590	–	–	–	–	–	–
$\text{tg } \varphi = 0.70$												
k_3	1.24	1.14	1.04	1.55	1.43	1.28	1.84	1.67	1.52	2.35	2.17	1.97
$T_{\text{п.г}}, \text{Н}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Крепление – бетонно-блочное $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 254 \text{ кгс/м}^2$ по слою геотекстиля												
$\text{tg } \varphi = 0.46, C = 500 \text{ кгс/м}^2$												
$G \cdot 10^3, \text{Н}$	3.92	10.1	29.3	5.0	13.3	40.0	6.2	16.9	51.6	9.0	25.6	81.7
$F \cdot 10^3, \text{Н}$	0.39	1.54	6.15	0.46	1.84	7.35	0.53	2.12	8.5	0.69	2.75	11.0
$P \cdot 10^3, \text{Н}$	3.38	8.5	24.0	4.5	11.5	35.0	5.78	15.5	47.0	7.97	22.5	71.6
$T \cdot 10^3, \text{Н}$	2.12	5.96	18.95	2.29	6.65	2.18	2.46	7.4	24.5	2.84	8.9	30.6
$\beta_{\text{ср}}, ^\circ$	72°	72°	72°	74°	74°	74°	77°	77°	77°	79°	79°	79°
$\sigma^*, \text{кгс/м}^2$	320	410	590	350	465	690	380	515	790	430	615	980
$\delta_o, \text{М}$	0.112	0.224	0.448	0.135	0.270	0.540	0.158	0.316	0.632	0.206	0.412	0.824
C/C_p	14.7	12.5	10.0	14.7	11.0	10.0	13.9	11.1	9.0	12.2	10.0	7.5
$C_p, \text{кгс/м}^2$	34	40	50	34	45	50	36	45	55	41	50	67
k_3	0.73	0.66	0.58	0.90	0.79	0.74	1.08	0.96	0.88	1.30	1.14	1.08
$l \text{ l g } C_p, \text{Н}$	360	880	2200	440	1200	3900	560	1400	3400	820	2030	5400
$k_{3,c}$	0.90	0.81	0.70	1.09	0.97	0.92	1.31	1.15	1.02	1.59	1.37	1.26
$T_{\text{п.г}}, \text{Н}$	570	2030	8000	229	1400	5700	–	300	2940	–	–	–
$T_{\text{п.г.с}}, \text{Н}$	212	1130	5700	–	200	1750	–	–	–	–	–	–
$\text{tg } \varphi = 0.70$												
k_3	1.12	1.00	0.89	1.38	1.21	1.12	1.64	1.46	1.34	1.97	1.77	1.64
$T_{\text{п.г}}, \text{Н}$	–	–	2080	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Табл 7.

Страна, название сооружения, источник	
Характеристика канала и крепления	Результаты наблюдений
ГЕРМАНИЯ, судоходный канал, [8]	
<p>Судоходные каналы внутренних водных путей, в том числе Среднегерманский канал.</p> <p>Глубина воды в канале 4 м, грунты – в основном илистые пески $\varphi = 32^\circ$, $K_{гр} \approx 6$ м/сут, высота надводного откоса $1 \div 1,5$ м. Интенсивность судоходства – 75 судов/сутки, только 10 % судов создает откат ≥ 30 см, высота волны $h_v \leq 0,8$ м, период волн – до 8 с.</p> <p>1. Крепление – каменная наброска, $\delta_{кр} = 0,4$ м, диаметр камня $15 \div 20$ см, по слою геотекстиля из нетканого материала $\delta = 6 \div 10$ мм с защитной сеткой, $m = 3$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 640$ кгс/м².</p> <p>Построены опытные участки с различной конструкцией концевых участков в местах сопряжения крепления с дном канала.</p> <p>2. Крепление – бетонно-блочное, состоит из бетонных блоков $66 \times 14 \times 12$ см, соединенных стальной проволокой диаметром 5 мм, $m = 3$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 220$ кгс/м². Масса блока – 23,4 кг, в воде – 14,3 кг. Просветность бетонно-блочного крепления 20%.</p> <p>Геотекстиль – нетканый материал $\delta = 6$ мм, $n = 0,85$, $k_f \approx 920$ м/сут, прочность на разрыв по длине – 2710 Н/м, по ширине – 2590 Н/м, удлинение – 90% и 80%.</p> <p>После укладки крепления проволочные связи закреплены на якорях на бровке канала.</p>	<p>Крепление хорошо защищает откосы при нормальных условиях судоходства.</p> <p>При сосредоточенном воздействии струи от работающих винтов на откос возможно вымывание крепления.</p> <p>Особо опасным является подмыв откоса продольным потоком. Поэтому необходимо устраивать специальные защитные устройства (шпунты, пригрузка крепления и др.).</p> <p>Десятилетний опыт эксплуатации гибкого крепления из соединенных бетонных блоков показал хорошие эксплуатационные и экономические качества крепления. До 1983 г. построено около 600 тыс. м² крепления.</p> <p><i>Особые замечания:</i> В процессе эксплуатации коэффициент фильтрации геотекстиля снизился до $100 \div 150$ м/сут, пористость – $0,32 \div 0,74$.</p> <p>На якорных связях при ударе волн зафиксированы в течение 12 с скачки растягивающих усилий до 50 Н.</p>
НИДЕРЛАНДЫ, большой волновой лоток, [14]	
<p>Большой волновой лоток длиной 200 м, глубина воды – 5 м. Высота волн – $0,35 \div 1,2$, период волн – 3, 4 и 5 с, длина волн – $13,8 \div 38$ м.</p> <p>Грунт откоса – песок, высота надводного откоса – 2,75 м.</p> <p>Крепление – бетонные блоки типа Армофлекс, $30 \times 33 \times 11,5$ см, связанные гибкими связями, $m = 3$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 220$ кгс/м². Просветность бетонно-блочного крепления 17%.</p> <p>Геотекстиль уложен по слою кварцевого песка $d = 37 \div 50$ мкм толщиной 25 см.</p> <p>Крепление уложено по надводной части откоса длиной 12 м и 6 м ниже уреза воды.</p> <p>Проведено 16 опытов продолжительностью 40 мин. (10 опытов – без заполнения пустот между блоками гравием $d = 3 \div 6$ мм и 6 опытов – с заполнением гравием)</p> <p>После укладки крепления проволочные связи закреплены на якорях на бровке канала.</p>	<p>Разрушение крепления отмечено в 4 опытах без заполнения пустот между блоками. Место разрушения – ниже уреза воды на глубине $\approx h_v$.</p> <p><i>Общее заключение:</i> Крепление при $h_v \leq 1$ м устойчиво. При этом заполнение пустот щебнем увеличивает устойчивость.</p> <p>Около 50% щебня, заполняющего пустоты, при волновом воздействии выносятся и откладывается у подножия откоса.</p>

Табл 8.

Страна, название сооружения, источник	
Характеристика канала и крепления	Результаты наблюдений
НИДЕРЛАНДЫ, судоходный канал, [15]	
<p>Проведены натурные исследования на судоходном Хартель – канале. Глубина воды в канале – 7 м, ширина канала по дну – 75 м, грунты – заиленные пески. Зафиксированы скорости воды у откосов при прохождении судов $0.6 \div 2$ м/с, высота волн $0.27 \div 0.86$ м.</p> <p>Крепление – бетонные блоки типа Армофлекс, $\delta_{кр} = 11$ см и АСЦ –Дельша, $\delta_{кр} = 16$ см по слою геотекстиля, $m = 4$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 220$ кгс/м² и 320 кгс/м².</p>	Крепление устойчиво, разрушений крепления не отмечено.
ГЕРМАНИЯ, судоходные реки и каналы, [17]	
<p>1. Крепление – каменная наброска, $d = 15 \div 25$ см, $\delta_{кр} = 0.6$ м по слою геотекстиля, $m = 3$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 960$ кгс/м².</p> <p>2. Крепление – каменная наброска, $d = 15 \div 25$ см, $\delta_{кр} = 0.4$ м по слою геотекстиля с заливкой камня цементным раствором или асфальтом, $m = 3$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 640$ кгс/м².</p>	<p>Разрушений крепления нет.</p> <p>Рекомендуется принимать толщину геотекстиля $\delta \geq 4.5$ мм для песков, $\delta \geq 6$ мм – для связных грунтов и $\delta \geq 10$ мм – в особых условиях для обеспечения устойчивости подошвы откоса.</p> <p>Масса камней для каменной наброски должна быть $5 \div 40$ кг.</p>
США, защитные дамбы и берега рек, [16]	
<p>Обобщен опыт применения высокопрочных тканей из полимерных волокон вместо песчано–гравийных фильтров при строительстве креплений откосов защитных дамб и берегов рек. В качестве пригрузки использовались каменная наброска и бетонные блоки, связанные с тканью. Площадь пор ткани – $4 \div 6\%$.</p> <p>1. Крепление – каменная наброска (масса камня $2.3 \div 182$ кг), $\delta_{кр} = 0.46$ м, $m = 3 \div 4$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 730$ кгс/м².</p> <p>2. Крепление – каменная наброска $\delta_{кр} = 0.9$ м, $m = 3 \div 4$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 1440$ кгс/м².</p> <p>3. Крепление – легкие ячеистые блоки, связанные с тканью. Масса блока – 5.9 кг, $m = 3 \div 4$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 147$ кгс/м².</p> <p>4. Крепление – блоки массой 52 кг, $m = 3 \div 4$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 220$ кгс/м².</p> <p>5. Крепление – блоки большие $122 \times 36 \times 9.2$ см, $m = 3 \div 4$, $\delta_{кр}\gamma_{кр} = 685$ кгс/м².</p> <p>Высота волн – до 1.2 м, период волн – $4 \div 5$ с, снижение уровня – до 0.9 м. Нагоны и сгоны – до 2.4 м.</p>	<p>Крепление из каменной наброски при $\delta_{кр} \geq 0.4$ м и из бетонных блоков $\delta_{кр} \times \gamma_{кр} \geq 200$ кгс/м² при $m = 3 \div 4$ хорошо противостоит воздействию судовых волн высотой до 1.2 м.</p> <p>Крепление необходимо располагать ниже уреза воды на глубину $\geq 2h$.</p> <p>Недостатком является низкая водопроницаемость ткани, что приводит к большому волновому противодействию. Контактная устойчивость между тканью и грунтом откоса недостаточная, так как возможно местное оплывание грунта под тканью и образование просадок крепления.</p>

Табл. 9.

m	h_c м	$\operatorname{tg} \varphi$	$H_{\text{кр}}$ м	P Н	$P_{\text{пр}}$ Н	T Н	k	$T_{\text{р.г}}$ Н	$[\delta_{\text{кр}}]$ м
Крепление – каменная наброска по слою геотекстиля $\delta_{\text{кр}} = 0.4$ м, $\gamma_{\text{кр}} = 1600$ кгс/м ³ , $\gamma_{\text{кр.взв.}} = 1000$ кгс/м ³									
2	0.3	0.62	0.24	1420	200	710	1.06	–	0.06
2	0.5	0.62	0.40	2350	550	1190	0.94	71	0.10
2	0.8	0.62	0.64	3800	1410	1900	0.78	420	0.15
2	1.0	0.62	0.79	4630	2160	2330	0.66	790	0.19
3	0.3	0.62	0.21	1770	155	590	1.70	–	0.06
3	0.5	0.62	0.35	2950	430	1000	1.56	–	0.06
3	0.8	0.62	0.56	4700	1100	1590	1.40	–	0.09
3	1.0	0.62	0.70	5900	1710	1980	1.30	–	0.12
4	0.3	0.62	0.20	2200	140	550	2.32	–	0.03
4	0.5	0.62	0.34	3800	400	950	2.22	–	0.05
4	0.8	0.62	0.54	6000	1020	1500	2.06	–	0.07
4	1.0	0.62	0.67	7400	1570	1860	1.95	–	0.09
Крепление – бетонно-блочное по слою геотекстиля $\delta_{\text{кр}} = 0.12$ м, $\gamma_{\text{кр}} = 1830$ кгс/м ³ , $\gamma_{\text{кр.взв.}} = 1040$ кгс/м ³									
2	0.3	0.62	0.24	440	200	220	0.68	70	0.06
2	0.5	0.62	0.40	735	550	370	0.31	250	0.10
2	0.8	0.62	0.64	1170	1410	590	< 0	–	0.14
2	1.0	0.62	0.79	1450	2160	680	< 0	–	0.18
3	0.3	0.62	0.21	550	155	185	1.32	–	0.06
3	0.5	0.62	0.35	920	430	310	0.98	6	0.06
3	0.8	0.62	0.56	1480	1100	490	0.48	380	0.09
3	1.0	0.62	0.70	1840	1710	610	0.13	530	0.12
4	0.3	0.62	0.20	690	140	170	2.02	–	0.03
4	0.5	0.62	0.34	1180	400	290	1.67	–	0.05
4	0.8	0.62	0.54	1860	1020	465	1.12	–	0.07
4	1.0	0.62	0.67	2300	1570	575	0.79	120	0.09

ния откоса начинается у подошвы откоса, где возможен размыв грунта продольным потоком. Такой поток может возникнуть (до 2 м/с) при движении судов или в естественных условиях для рек, особенно в паводковый период. Если крепление устраивается не на всю длину подводного откоса, то минимальная глубина, на которой заканчивается крепление, должно быть не менее $2h$.

Приведенная выше методика расчета крепления при воздействии судовых волн позволяет определить коэффициент устойчивости крепления k и растягивающие усилия в геотекстиле $T_{\text{р.г}}$.

Рассмотрим две конструкции крепления откосов судоходных каналов внутренних водных путей в Германии.

Канал глубиной 4 м при $m = 3$ и $m = 4$ проходит в однородных заиленных песках $\varphi = 32^\circ$, $\operatorname{tg} \varphi = 0.62$. Крепление откосов каналов:

– каменная наброска толщиной $\delta_{\text{кр}} = 0.4$ м,

$\gamma_{\text{кр}} = 1600$ кгс/м³, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 640$ кгс/м², $\gamma_{\text{кр.взв.}} = 1000$ кгс/м³, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр.взв.}} = 400$ кгс/м²;

– бетонно-блочное крепление из блоков толщиной $\delta_{\text{кр}} = 0.12$ м, скрепленных гибкими связями из проволоки $d = 5$ мм, $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр}} = 220$ кгс/м², $\delta_{\text{кр}} \gamma_{\text{кр.взв.}} = 125$ кгс/м², $\gamma_{\text{кр}} = 1830$ кгс/м³, $\gamma_{\text{кр.взв.}} = 1040$ кгс/м³.

Крепление в том и другом случае уложено по слою геотекстиля. Геотекстиль и бетонно-блочное крепление закреплены на берме откоса к якорному устройству. Высота судовых волн $h_c = 0.3 \div 1$ м, $\lambda/h_c = 7$. Прочность на разрыв геотекстиля 2740 Н/м.

Расчеты проводили по зависимостям при воздействии судовых волн.

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 9, видно, что крепление из каменной наброски при $m = 3$, использованное на Среднегерманском судоходном канале, устойчиво при $h_c \leq 1$ м. Геотекстиль

и все крепление не работает на растяжение.

Крепление из бетонных блоков, устойчивое в действительности, по расчету может быть устойчивым, если растягивающие усилия, возникающие в креплении, будут восприниматься самим креплением. В табл. 9 эти усилия обозначены $T_{p.g.}$. При $m = 3$ эти усилия появляются при $h_c > 0.5$ м и при $h_c = 1$ м составляют 530 Н на полоску крепления шириной 1 м. Эти усилия могут быть восприняты гибкими связями или геотекстилем, для которого разрывное усилие составляет 2740 Н/м. Датчики, установленные на гибких связях, заанкеренных на бровке канала, зафиксировали усилие на растяжение ~ 50 Н (или $100 \div 150$ Н/м) при обрушении максимальной судовой волны $h_c \approx 0.86$ м. Столь малое усилие на анкере может быть объяснено тем, что надводная часть крепления, обладая большим коэффициентом k , компенсирует $T_{p.g.}$, возникающие в зоне обрушения волны.

Считаем, что методика расчета, изложенная выше, подтверждается результатами натурных исследований на Среднегерманском судоходном канале.

5. ВРЕМЕННЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И СТРОИТЕЛЬСТВУ ГИБКОГО КРЕПЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОТЕКСТИЛЯ

Настоящие рекомендации относятся к проектированию и строительству гибкого крепления на опытно-производственных участках. Такое ограничение связано с тем, что зарубежный опыт не учитывает ледовое воздействие на крепление, так как строительство гибких креплений с использованием геотекстиля ведется в странах (Германия, Дания, Голландия, Южные штаты США, Индия и др.) с мягким климатом или непродолжительным ледоставом при малой толщине льда. Для условий Украины максимальная толщина льда может изменяться от 0.4 м (север Украины) до 0.25 м (юг Украины) и в зависимости от характера погоды весной ледоход на реках может происходить довольно интенсивно. Поэтому конструкции гибкого крепления, приведенные выше, должны пройти опытно-промышленную проверку.

Гибкое крепление с использованием геотекстиля имеет ряд преимуществ, главные из которых следующие:

- геотекстиль выполняет роль обратного фильтра и надежно защищает грунт откоса от размыва,
- гибкое крепление обладает способностью к “самозалечиванию” при просадках грунта откоса и

подмыве концевых участков крепления,

- гибкое крепление с использованием бетонных блоков позволяет механизировать процесс строительства крепления.

Предлагаем следующие конструкции гибкого крепления.

5.1. Гибкое крепление из каменной наброски, рис. 11А

Эту конструкцию можно использовать:

- при $m = 3 \div 4$,
- при воздействии судовых и ветровых волн с расчетной высотой волн не более 1 м,
- при мгновенном понижении уровня перед откосом не более 2 м,
- при ледовом воздействии при максимальной толщине льда не более 0.4 м.

Геотекстиль представляет собой двухслойную структуру, состоящую из защитной сетки с ячейками $10 \div 15$ мм из полимерных волокон и собственно фильтра из нетканого материала из полимерных волокон, который должен иметь прочность на разрыв не менее 10000 Н/м, коэффициент фильтрации не менее 200 м/сут, толщину не менее 6 мм.

5.2. Гибкое крепление из бетонных блоков конструкции “Укрводстро́я”, скрепленных шарнирами и гибкими связями, рис.11Б

Эту конструкцию можно использовать:

- при $m = 3 \div 4$,
- при высоте расчетных ветровых волн не более 0.5 м,
- при колебаниях уровня воды перед откосом не более 1 м,
- при скорости снижения уровня не более $10K_{гр}$, где $K_{гр}$ – коэффициент фильтрации грунта откоса.

Геотекстиль: защитная сетка с ячейками 10×15 мм из полимерных волокон и нетканый материал из полимерных волокон, который должен иметь прочность на разрыв не менее 10000 Н/м, коэффициент фильтрации не менее 200 м/сут, толщину не менее 2 мм.

Рекомендуем использовать эту конструкцию крепления на внутренних водоемах и заливах рек, где не будет воздействия на крепление движущихся льдин.

5.3. Гибкое крепление из бетонных блоков, рис. 11В

Эту конструкцию можно использовать:

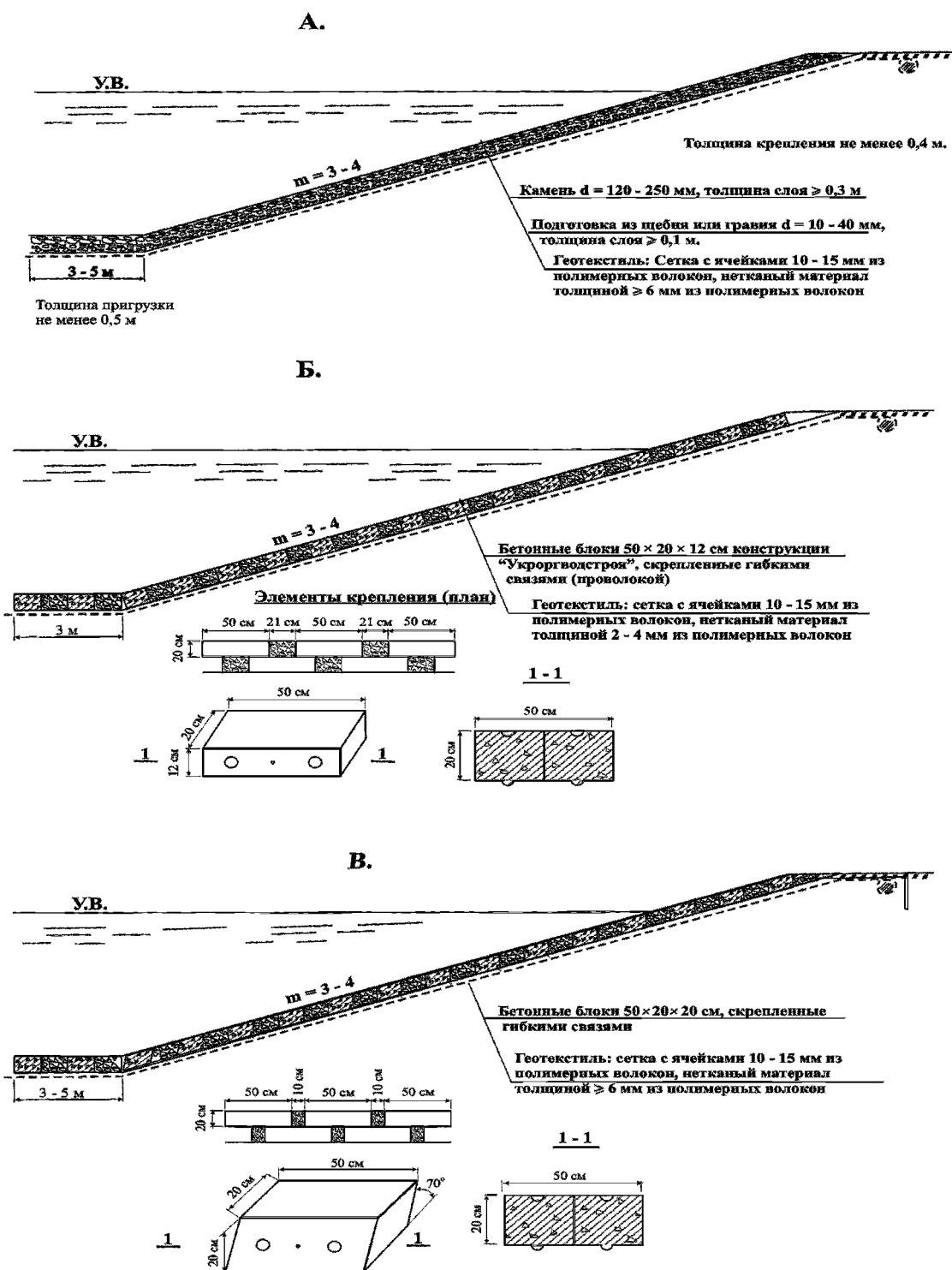


Рис. 11. Схемы конструкций гибких креплений с использованием геотекстиля

- при $m = 3 \div 4$,
- при воздействии судовых и ветровых волн с расчетной высотой волн не более 1 м,
- при мгновенном понижении уровня перед откосом не более 2 м,
- при ледовом воздействии при максимальной толщине льда не более 0.4 м.

Геотекстиль: защитная сетка с ячейками 20×15 мм из полимерных волокон и нетканый материал из полимерных волокон, который должен иметь прочность на разрыв не менее 10000 Н/м, коэффициент фильтрации не менее 200 м/сут, толщину не менее 6 мм.

1. Athanasopoulos G. A., Atmatzidis D. K., Bousias P. Sand-geotextile interaction by direct shear testing // Proc. 4th Int. Conf., The Hague, 28 May – 1 June. – Vol. 2.– Rotterdam, 1990.– P. 795.
2. Venkatappa Rao G., Kate J. M. Interface friction evaluation of some Indian geotextiles // Proc. 4th Int. Conf., The Hague, 28 May – 1 June. – Vol. 2.– Rotterdam, 1990.– P. 793.
3. Соболевский Ю. А. Устойчивость откосов мелиоративных каналов.– Минск: Урожай, 1965.– 212 с.
4. Wise E. G. Development parameters for integrated flexible revetment systems // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 81–90.
5. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения.– Л.: Энергия, 1967.– 460 с.
6. Беляшевский Н. Н., Бугай Н. Г. Отчет по теме “Исследование устойчивости откосов магистрального Рогачевского канала и рекомендации по его креплению”.– Киев: Институт гидромеханики НАН Украины, 1969.– 85 с.
7. Канарский В. Ф. Крепление волновых откосов гидротехнических сооружений.– Киев: Будівельник, 1971.– 76 с.
8. Heerten G., Meyer H., Muhring W. Experience with a flexible interlocking revetment system at the Mittellandkanal in Germany // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 106–114.
9. Вишневський В. І. Річки і водойми України. Стан і використання.– Київ: ВІПОЛ, 2000.– 376 с.
10. Шабанов А. Д. Крепление напорных земляных откосов.– М.: Стройиздат, 1967.– 140 с.
11. Мухамеджанов Г., Пудов Ю. Выбор геотекстиля. Рекомендации проектировщикам // Технический текстиль.– 2001.– N 3.– С. 9–11.
12. СНиП 2.06.04-82 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов.– М.: Госстрой СССР, 1989.– 40 с.
13. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами.– Киев: Наукова думка, 1980.– 214 с.
14. C. van den Berg, Lindenberg J. Stability of Armorflex revetment system under wale attack // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 90–99.
15. Pilarczyk K. W. Prototype tests of slope protection systems // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 126–136.
16. Dement L. E., Fowler J. Case histories using filter fabric underneath revetments in lower Louisiana // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 145–161.
17. Abromeit H.-U. Biding Procedures and Placing Operation of Geotextile Filter Layers // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 137–139.