

Берегозащитные сооружения откосного типа на водохранилищах Беларуси и причины их деформаций

Докт. техн. наук, доц. В. Е. Левкевич¹⁾

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

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

Реферат. На основании обследования сооружений берегозащиты более чем по 100 водохранилищам страны выполнена оценка современного состояния различных видов креплений с выявлением причин их разрушений и масштабов деформаций. В статье приведены результаты натурных наблюдений за берегозащитными сооружениями откосного типа, применяемыми на водохранилищах Беларуси. Наиболее распространенные крепления берегов и откосов – крепления в виде железобетонных монолитных либо сборных плит. Определено, что деформации креплений откосов представлены раскрытием межплиточных строительных, температурных и осадочных швов (зарегистрирована ширина раскрытия до 0,35 м), которые развиваются под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и других факторов. В последующем деформации обнажившихся швов ведут к разрушению крепления. Деформация откосов в ряде случаев достигает значительных величин: линейная переработка (разрушение) откосов до 24,20 м, объем размывов до 4,25 м³/м пог. Физическое моделирование деформаций откосов, выполненное в гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета на моделях грунтовых подпорных сооружений, защищенных железобетонным креплением с различной шириной раскрытия швов, позволило установить динамику и масштабы развития деформаций откоса при воздействии волнового и уровня режимов, имеющих различные параметры. Данные натурных обследований креплений дали возможность выполнить оценку состояния покрытий откосов при разных сроках эксплуатации подпорных сооружений. В статье приведены причины и факторы, влияющие на устойчивость креплений. Результаты натурных и лабораторных исследований устойчивости креплений позволили установить влияние на развитие деформаций различных причин, к которым относятся: наличие в принятых расчетных проектных схемах и зависимостях определения параметров креплений объективных неточностей и допущений; отсутствие полноты учета условий волнообразования и уровня режима водохранилищ; в исходных данных и материалах изысканий не всегда достоверно представлена информация о грунтовых условиях строительства объекта берегозащиты; технологические отклонения при строительстве сооружений и их креплений. Установлено, что одной из характеристик, определяющих динамическую устойчивость берегов и откосов сооружений в условиях водохранилищ Беларуси, наряду с вышеприведенными причинами, является состав размываемого грунта, характеризуемый, в частности, коэффициентом неоднородности несвязного грунта. Выявленный в процессе исследования устойчивости креплений эффект самоотмокания, образующейся при разрушении берега, сложенного несвязными грунтами с повышенной неоднородностью, позволил предложить способ крепления откосов и берегов. На основе данных натурных исследований и лабораторных экспериментов получены эмпирические зависимости для расчета профиля динамического равновесия с самоотмоканием двух типов. Предложен расчет комбинированного крепления откосов, состоящий из каменной отсыпки и синтетических фильтрующих материалов повышенной прочности.

Ключевые слова: крепление откоса, водохранилище, берег, деформация, абразия, переработка, профиль динамического равновесия, линейное отступление берега, объем размыва, самоотмокание, самоукрепление, каменная наброска

Для цитирования: Левкевич, В. Е. Берегозащитные сооружения откосного типа на водохранилищах Беларуси и причины их деформаций / В. Е. Левкевич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 478–488. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-478-488>

Адрес для переписки

Левкевич Виктор Евгеньевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-71-74
levkevich@bntu.by

Address for correspondence

Levkevich Victor E.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-71-74
levkevich@bntu.by

Slope Protection Structures at Water Reservoirs in Belarus and Causes of their Deformations

V. E. Levkevich¹⁾

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

Abstract. Assessment of the current state in respect of various bank stabilization with identification of causes of their destruction and deformation scale has been carried out on the basis of the survey pertaining to coastal protection structures in more than 100 reservoirs of the country. The paper presents results of field observations on bank slope protection structures which are used at water reservoirs in Belarus. It has been established that the most common protection of banks and slopes is strengthening in the form of reinforced concrete monolithic or prefabricated slabs. It has been determined that deformations of slope protection are represented by opening of tile-to-tile construction, temperature and settlement joints (it has been recorded opening width of 0.35 m) which develop under a complex impact of wind waves, fluctuations in levels and other factors. Subsequently deformations of exposed joints lead to destruction of the protection. Value of slope deformations reaches in some cases rather significant extent: linear processing (destruction) of slopes – up to 24.20 m; volume of erosion – up to 4.25 m³/m running. Physical modeling of slope deformations carried out at a hydro-technical laboratory of the Belarusian National Technical University while using models of ground retaining structures protected by reinforced concrete strengthening with various opening width of joints has allowed to determine dynamics and scope of slope deformations due to the influence of wave and level regimes having various parameters. Data of on-site investigations on protection have made it possible to assess the state of slope paving for various operational periods of retaining structures. The paper presents reasons and factors that affect the protection stability. The results of on-site and laboratory investigations on protection stability have permitted to determine that the following reasons influence on the development of deformations: presence of objective inaccuracies and assumptions in the accepted calculated design schemes and dependencies for determination of protection parameters; lack of completeness in registration of conditions for wave formation and level regime of reservoirs; initial data and survey materials do not always provide true information about ground conditions for construction of bank protection facility; technological deviations while constructing structures and their protection. It has been ascertained that one of the characteristics determining a dynamic stability of banks and slopes in structures under conditions of the reservoirs in Belarus along with the above reasons is a composition of the eroded soil characterized, in particular, by a inhomogeneity coefficient of loose soil. A self-pavement effect identified during the study of protection stability and formed during destruction of a bank composed of loose soils with increased heterogeneity has made it possible to propose a method for protecting slopes and banks. On-site investigations and laboratory experiments have permitted to obtain empirical relationships for calculation of dynamic equilibrium profile with self-pavement of two types. The paper provides a calculation for combined slope protection consisting of rockfill and synthetic filter materials of increased strength.

Keywords: slope protection, reservoir, bank, deformation, abrasion, processing, dynamic equilibrium profile, linear bank retreat, erosion volume, self-pavement, self-reinforcement, rock rip-rap

For citation: Levkevich V. E. (2018) Slope Protection Structures at Water Reservoirs in Belarus and Causes of their Deformations. *Science and Technique*. 17 (6), 478–488. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-478-488> (in Russian)

Введение

Защита берегов водохранилищ, а также верховых откосов дамб и плотин осуществляется с помощью различных берегозащитных сооружений – креплений, которые по характеру взаимодействия с волновым потоком подразделяются на активные и пассивные.

Активные типы сооружений – волноломы, молы, а также искусственные намытые или отсыпанные пляжи. Кроме того, к этому типу креплений относится биологическое крепление откосов в виде залужения или посадки высшей древесной растительности, преимущественно лиственных быстрорастущих пород (ивы, лозы, черемухи черной и др.) [1–3].

Пассивные типы берегозащитных сооружений [1–3] представлены волнобойными стенка-

ми и откосными креплениями с закреплением верхового откоса каменной наброской, мощением (сборным железобетонным и монолитным бетонным).

В статье приведены результаты исследований состояния эксплуатируемых в стране берегозащитных сооружений только пассивного типа, причем лишь откосного крепления из железобетонного покрытия, рассмотрены причины развития деформаций креплений и альтернативные типы креплений из естественного валунного материала.

Основная часть

Обследование креплений берегов и откосов водохранилищ Беларуси показало, что большинство из них с течением времени начина-

ют деформироваться и разрушаться. Наиболее распространены бетонные и железобетонные крепления. Основными причинами повреждений бетонных креплений являются: слабое уплотнение швов, некачественное выполнение бетонных работ и подготовки, низкий уровень эксплуатации, что ведет к раскрытию швов, выносу грунта из-под плит и последующему разрушению покрытий. Общая длина укрепленных берегов и берегоукрепительных сооружений на водохранилищах Беларуси составляет около 250 км. Длина поврежденных и разрушенных берегоукрепительных конструкций и сооружений, по данным натурных обследований автора, проведенных в 2013–2016 гг., около 110 км, что составляет примерно 50 % протяженности всех креплений [4, 5].

Дамбы обвалования – самый распространенный тип берегозащитных сооружений в Беларуси. Они часто используются в качестве защитного мероприятия от затопления на водохранилищах русловой формы (водохранилища Вилейское, Заславское, Дрозды, Солигорское, Красная Слобода) или при строительстве водных объектов наливного типа (водохранилища Малые Автюки, Загатье, Смолевичское, Коммунар и т. д.). Высота дамб обвалования редко превышает 5–7 м.

В качестве защитного мероприятия от развития эрозионных процессов в практике отечественной берегозащиты применяются также крепления откосного типа различных конструкций [3–6] (рис. 1).

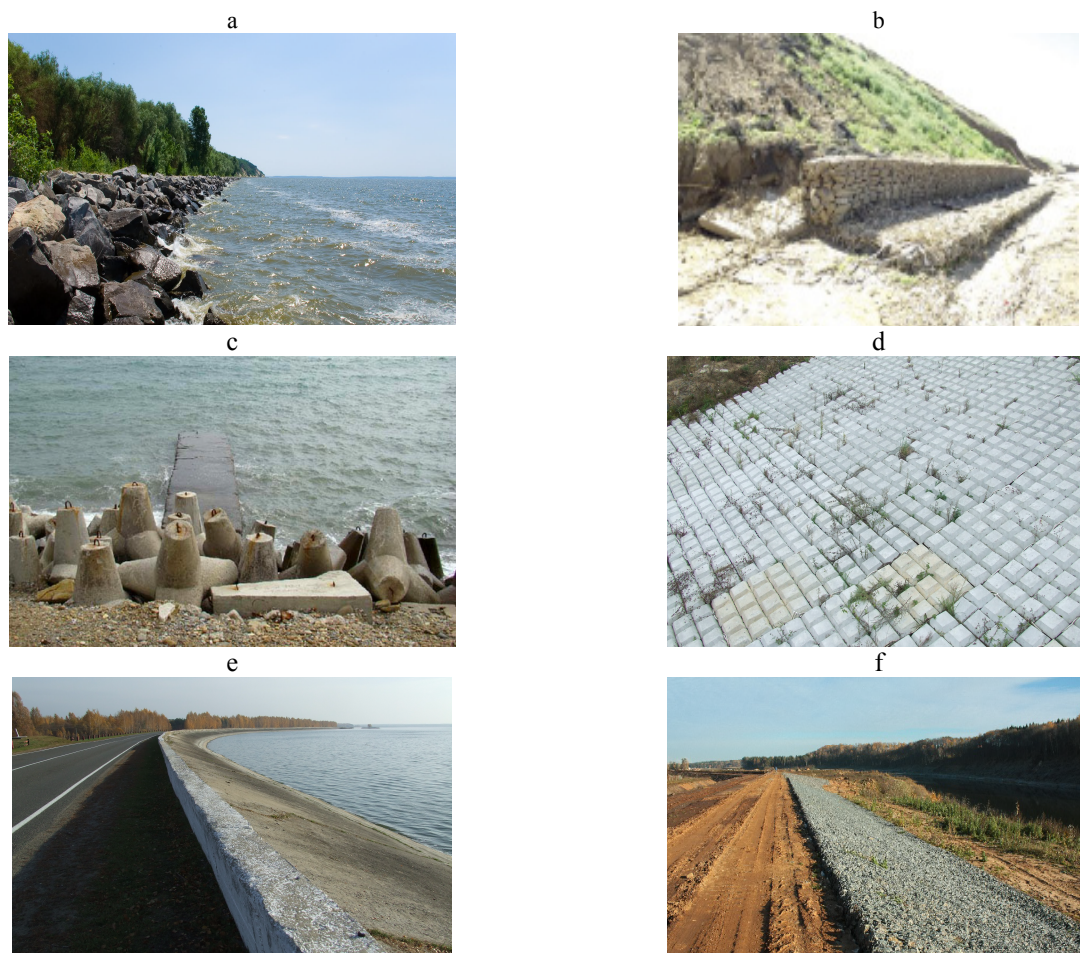


Рис. 1. Примеры крепления откосов: а – каменная отсыпка; б – подпорная стенка; в – крепление железобетонными тетраподами; д – гибкое железобетонное крепление откоса; е – крепление откоса плитами; ф – комбинированное крепление откоса камнем и металлической сеткой

Fig. 1. Examples of slope protection: а – rockfill; б – retaining wall; в – protection with reinforced tetrapod; д – flexible reinforced slope protection; е – slope protection with slabs; ф – combined slope protection with stone and metal mesh

На основе сведений натурных обследований сооружений, лабораторных исследований, а также опубликованных материалов автором выполнено обоснование конструктивных решений по креплению верховых откосов дамб и плотин, наиболее часто применяемых в условиях водохранилищ Беларуси. Предлагается использовать конструкции креплений, приведенных в работах Е. М. Левкевича, Н. В. Сурмы, Х. Р. Молеро, А. П. Чеплашкина, С. С. Агалакова, И. Г. Бельченко, М. В. Чукубаева, С. С. Чукубаевой, Б. В. Глазырина, которые отличаются конструктивными особенностями, себестоимостью и эффективностью. Такие крепления рекомендуются к практическому использованию в условиях Беларуси (рис. 2).

Обобщение и анализ материалов, полученных в результате обследования более чем 100 водохранилищ страны [4, 5], показали, что крепления в период эксплуатации подвержены деформациям, в результате чего происходят местные размывы их верховых откосов, обусловленные различными причинами. К последним относятся:

– наличие в принятых расчетных проектных схемах и зависимостях определения параметров креплений объективных неточностей и допущений;

– отсутствие полноты учета условий волнообразования и уровня режима водохранилищ;

– в исходных данных и материалах изысканий не всегда достоверно представлена информация о грунтовых условиях строительства объекта берегозащиты;

– технологические отклонения при строительстве сооружений и их креплений.

Приведенные причинно-следственные условия ведут к развитию деформаций откосов и их креплений. Деформация откосов в ряде случаев достигает значительных величин: линейная переработка (разрушение) откосов S_t до 24,20 м, объем размывов Q_t до 4,25 м³/м пог. Сведения о масштабах размывов и деформаций верховых откосов дамб и плотин [4, 5] приведены в табл. 1.

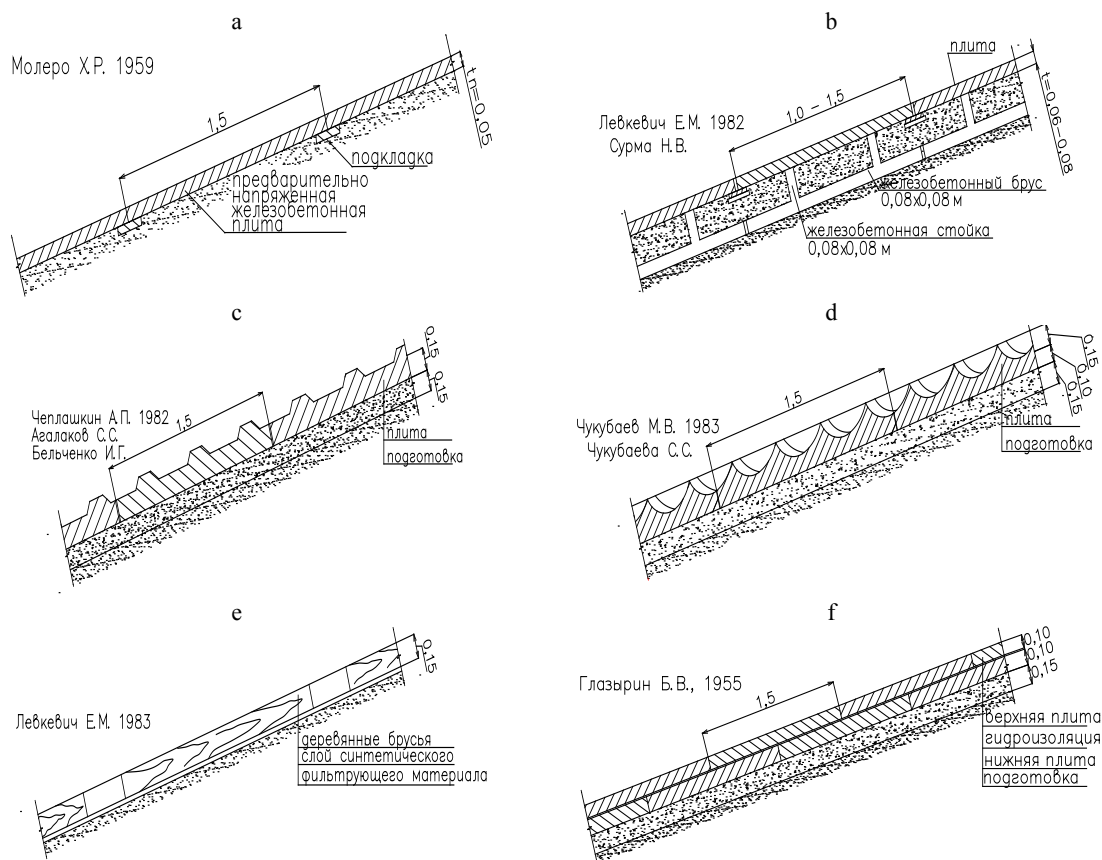


Рис. 2. Крепления, рекомендуемые для условий Беларуси

Fig. 2. Protection recommended for conditions of Belarus

Таблица 1

Деформации верховых откосов дамб и плотин
Deformations of upper slopes in dikes and dams

Название водохранилища	Длина участка размыва $L_{абр}$, м	Объем переработки верхового незакрепленного откоса Q_t , $м^3/м$ пог.	
Краснослободское	700	5,90	2,26
Солигорское	4500	6,20	2,22
Локтыши	650	6,70	2,46
Погост	500	8,50	4,25
Любашевское	450	5,50	2,19
Большие Орлы	650	7,30	1,51
Бобруйковское	250	2,50	0,31
Головчицкое	300	4,50	1,08
Загатье	500	5,00	0,50
Коммунар	350	2,00	0,30
Малые Автюки	450	3,00	0,90
Красный Боец	300	8,00	2,64
Судково	750	24,20	2,40

Монолитные железобетонные крепления обычно выполняются из плит толщиной до 0,20 м на слое песчано-гравийной подготовки. Плиты разрезаются температурно-осадочными швами по всей высоте откоса (рис. 3).

Сборно-монолитные крепления выполняются из отдельных плит размерами 4,0×1,75 м с последующим омоноличиванием швов (Солигорское, Заславское, Любанское и другие водохранилища). Толщина плит крепления при этом составляет 0,15–0,20 м, а гравийной подготовки до 0,20 м.

Обследование водных объектов, расположенных в различных регионах страны (Поозерье, Центральная часть, Полесье) с разными типами креплений, показало, что наряду с вышеуказанными причинами нарушения условий нормальной эксплуатации сооружений берего-

защиты и одной из важнейших причин образования повреждений бетонных и железобетонных креплений является некачественное уплотнение швов и гравийной подготовки на стадии строительства. Это в итоге приводит к переработке откосов волновым потоком в пространстве под плитами при различных положениях уровня верхнего бьефа водохранилищ, выносу грунта из-под плит и их последующему разрушению (рис. 4).

Наиболее часто встречаемые виды деформации креплений и причины их возникновения приведены в табл. 2.

Изучение совместного воздействия волнения, а также колебания уровней на устойчивость плит креплений проводилось автором в волновом лотке гидротехнической лаборатории БНТУ на размываемой модели откоса заложением 1:3 с креплением из железобетонных плит толщиной 2,2 см и открытыми швами (рис. 5). Моделирование выполнялось в масштабе 1:10. Опыты позволили оценить характер воздействия волнового потока на крепление и вымыв грунта откоса из-под плит, установить зависимость объемных деформаций откоса Q_t от ширины раскрытия швов $b_{шва}$, высоты волны h и уровней воды в лотке (рис. 6) [4–6].

На рис. 5 приведены графики вида $Q_t = f(b_{шва})$, полученные по данным лабораторных экспериментов, отображающие связь величины объема выносимого грунта Q_t из-под плит в зависимости от ширины раскрытия межплитных швов $b_{шва}$. Учитывая принятый масштаб моделирования (1:10), графики позволяют в первом приближении получать величины возможных объемов разрушений откосов под плитами крепления в зависимости от параметров волнения (высоты волны) и глубины в водоеме [7, 8].

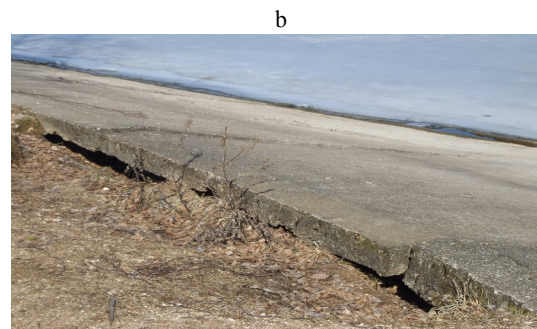
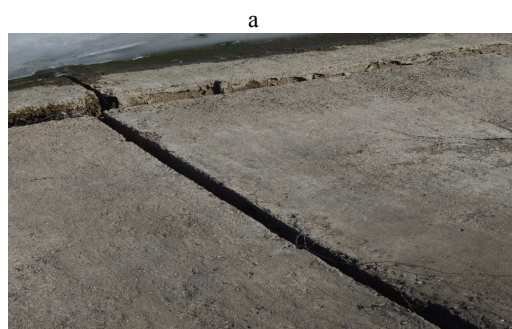


Рис. 3. Повреждение железобетонного крепления откосов: а – осадочные швы; б – температурные швы

Fig. 3. Damage of reinforced concrete slope protection: a – settlement joints; b – temperature joints



Рис. 4. Характерные разрушения железобетонных креплений откосов водохранилищ:
а – Заславского; б – Чигиринского; с – Лепельского; д – Любаньского

Fig. 4. Common destructions of reinforced concrete slope protection for reservoirs:
a – Zaslavsky; b – Chigirinsky; c – Lepelskoe; d – Lubanskoye

Таблица 2

Виды деформаций креплений откосов и причины их возникновения

Types of deformations in slope protection and reasons for their occurrence

Название водохранилища (тип, вид регулирования)	Амплитуда колебания уровней, м	Причина нарушения устойчивости крепления	
		Тип деформации	Ширина раскрытия межплиточных швов $b_{шва}$, м
Заславское (русловое, многолетнее)	1,2	Просадка железобетонных плит верхового напорного откоса грунтовой плотины	0,05–0,20
Острошицкий Городок (русловое, сезонное)	0,5	Разрушение монолитного крепления откоса в районе водосброса	0,20–0,30
Лошанское (русловое, сезонное)	1,0	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса плотины	0,05–0,10
Любаньское (русловое, сезонное)	1,3	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса плотины и самих плит	0,05–0,20
Локтыши (русловое, сезонное)	1,0	Разрушение заполнения швов плит крепления плотины водохранилища	0,15–0,20
Княжеборское (русловое, сезонное)	0,2	Вывод грунта из-под монолитного берегоукрепительного сооружения, образование трещин и провалов	0,15–0,30
Лепельское (озерное, сезонное)	1,1	Разрушение заполнения швов между плитами крепления откоса, вынос грунта из-под плит	0,20–0,35
Тетеринское (русловое, сезонное)	0,7	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса плотины	0,10–0,20



Рис. 5. Лабораторные исследования разрушения железобетонных креплений откосов:
а – начальная стадия разрушения; б – стадия обрушения крепления

Fig. 5. Laboratory investigations on destruction of reinforced concrete slope protection:
а – initial stage of destruction; б – stage of protection collapse

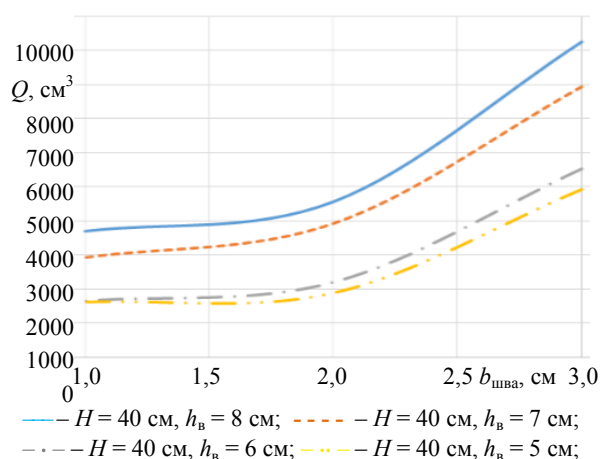


Рис. 6. Зависимость объема вымытого из-под крепления грунта от ширины раскрытия швов при:
 $H = 0,35\text{--}0,40$ м; $h_b = 0,05\text{--}0,08$ м

Fig. 6. Dependence of washed up soil volume from under protection on joint opening width at $H = 0.35\text{--}0.40$ m; $h_b = 0.05\text{--}0.08$ m

Наблюдения, проведенные автором на ряде водохранилищ страны, позволили выявить природный эффект, который состоит в том, что при абразии (переработке береговых склонов, сложенных несвязными грунтами с повышенной неоднородностью) образуются береговые отмели, покрытые валунами, галькой и другим крупнофракционным материалом, устойчивым к воздействию волн, колебанию уровней, подвижкам ледового покрова и т. д. Валунно-галечниковый материал образует на поверхности отмели естественную самоотмокку из слоя наиболее крупных фракций за счет выноса находящихся между ними более мелких частиц (рис. 7), препятствующую ее разрушению.



Рис. 7. Образование естественной самоотмокки на водохранилищах: а – Заславском; б – Дубровском

Fig. 7. Formation of natural self-pavement in reservoirs: а – Zaslavsky; б – Dubrovskoe

Установлено, что одной из характеристик, определяющих динамическую устойчивость берегов в условиях водохранилищ Беларуси, является состав размываемого грунта, в частности коэффициент неоднородности несвязного грунта η [9, 10].

Лабораторные исследования образования самоотмостки, проведенные автором в гидротехнической лаборатории БНТУ, позволили изучить механизм закрепления поверхности отмели $B_{\text{Пс}}$ (рис. 8) в зависимости от неоднородности материала и оценить скорость процесса переработки и формирования профиля равновесия.

В качестве основного «базового» грунта, образующего тело модели, использовались однородный среднезернистый песок с $d_{50} = 0,5$ мм и песчано-гравийная смесь с крупнофракционными добавками. Исследовалось влияние на динамику разрушения модели 1-, 2-, 3- и 4-компонентных песчано-гравийных смесей, имеющих разный средний диаметр частиц D_{50} и коэффициент неоднородности η_0 при различном содержании крупнозернистых включений: 10, 25, 50 и 75 %. В опытах в качестве добавки применялся сортированный гравий с $D_{50} = 1,5; 3,5; 7,5$ и 12,5 мм. Обеспечение условий автомодельности выполнялось по [1, 2, 6]. Моделирование откоса проводилось без искажений линейного масштаба, как для условий галечно-гравийных грунтов. Всего проведено 18 серий опытов. В качестве «оптимального» состава размываемого грунта, при котором наблюдался наибольший берегозащитный тормозящий эффект, экспериментальным путем была определена смесь, имеющая содержание гравелистых частиц $P = 25$ %. Лабораторные эксперименты показали, а натурные наблюдения подтвердили, что возможно образование двух основных типов профиля, имеющего покрытие из крупнофракционного материала: первый – при размыве грунта с содержанием крупных фракций более 25 %, второй – с содержанием крупных фракций менее 25 % (рис. 8).

В результате лабораторных опытов получен ряд зависимостей для расчета отдельных эле-

ментов профиля откоса, закрепляемого самоотмосткой (табл. 3) [5, 6].

Наряду с самоотмосткой, обеспечивающей крепление откосов, можно производить защиту размываемых береговых склонов путем отсыпки естественного камня различного фракционного состава. Расчет диаметра частиц отсыпaeмого материала может выполняться по зависимостям, приведенным в [12].

Для расчета диаметра каменной наброски $D_{\text{ш}}$, защищающей откос на участке дамбы или плотины, подверженном волновому воздействию, наиболее часто используются следующие формулы [12]:

$$D_{\text{ш}} = \sqrt[3]{\frac{M}{0,524\rho_k}}; \quad (1)$$

$$D_{\text{б}} = 1,5Ch_{1\%} \left(\frac{\sqrt[3]{m_{h1\%}}}{m} + 0,5 \right) \frac{m+1,8}{1,8m-1} \frac{\gamma_a}{\gamma_k - \gamma_a}, \quad (2)$$

где M – масса камня, т, определяемая по формуле

$$M = \frac{0,079\rho_k h_{1\%}^3}{\left(\frac{\rho_k}{\rho_b} - 1 \right)^3 \sqrt{1+m^3}} \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{h_{1\%}}}; \quad (3)$$

C – гидравлический коэффициент сопротивления, принимаемый равным 0,2 при диаметре камня более 0,15 м и высоте волны более 0,5 м; $m_{h1\%}$ – пологость волны 1%-й обеспеченности, принимаемая для водохранилищ равной 7; γ_a – удельный вес аэрированной воды, стекающей с наброски в конце отката волны, принимаемый 10 кН/м³; γ_k – удельный вес камня, который можно принять 26,5 кН/м³; ρ_k, ρ_b – плотность камня и воды, т/м³; $\bar{\lambda}, h_{1\%}$ – длина и высота расчетной волны, м.

Расчет высоты волны производится по ТКП 45-3.04-170-2009 [11]. Для условий водохранилищ Беларуси, например водохранилища Витебской ГЭС, расчетная высота волны может быть принята следующих параметров: длина волны $\lambda = 15$ м; высота волны 1%-й обеспеченности $h_{1\%} = 0,72$ м.

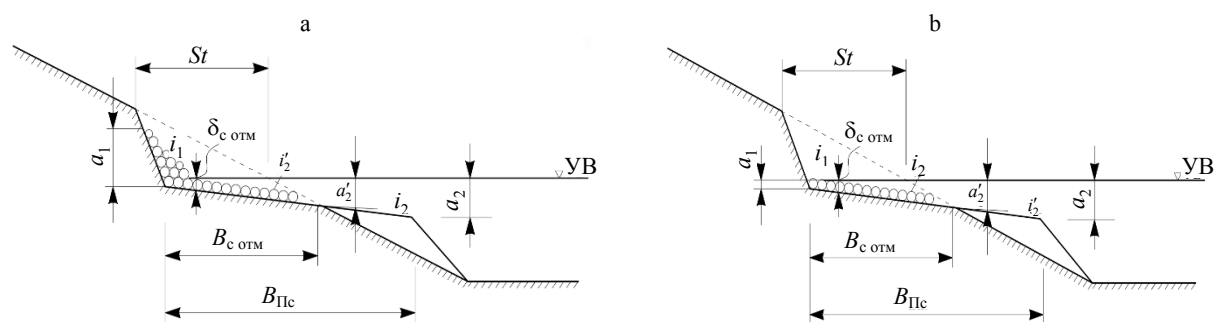


Рис. 8. Варианты профиля равновесия в зависимости от содержания крупнофракционного материала в грунте [11]:
а – профиль с призмой (25 % < P < 50 %); б – профиль без призмы (10 % < P < 25 %)

Fig. 8. Variants of equilibrium profile depending on content of large-fraction material in soil [11]:
а – profile with prism (25 % < P < 50 %); б – profile without prism (10 % < P < 25 %)

Таблица 3

Зависимости для расчета элементов профиля с креплением самоотмосткой
Dependencies for calculation of profile elements with protection using self-pavement

Тип профиля с самоотмосткой	Элемент профиля	Расчетная зависимость
Самоотмостка с призмой на урезе при 25 % ≤ P _{гр} ≤ 50 %	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = (1,5 - 2,0)\delta_{\text{отм}}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a'_2 = 0,36 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} \eta_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a'_2 / 0,70$
	Уклон призмы самоотмостки выше уреза воды	$i_1 = 0,032 \left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{D_{50} \eta_0^{0,3}} \right)^{\frac{2}{3}} + i_0$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i'_2 = 0,028 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,50 i'_2$
Профиль с самоотмосткой без призмы при 10 % ≤ P _{гр} ≤ 25 %	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = \delta_{\text{отм}}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a'_2 = 0,27 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} \eta_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a'_2 / 0,80$
	Уклон самоотмостки на урезе воды	$i_1 = i'_2$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i'_2 = 0,012 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,60 i'_2$
Обозначения: a_1, a_2, a'_2 – предел размыва, глубина в конце самоотмостки, м; $\delta_{\text{отм}}$ – толщина слоя отмости, м; $h_{1\%}$ – высота волны, м; λ_0 – относительная длина волны, м; D_{50}, d_{50} – средневзвешенная крупность частиц соответственно размываемого грунта и самоотмостки, м; η_0 – коэффициент неоднородности размываемого грунта; i_0, i_1, i'_2 – уклон исходного профиля и поверхности элементов самоотмостки соответственно.		

Подставив в (1) и (3) расчетные значения параметров волнения при $\rho_k = 2,65 \text{ т/м}^3$ и $\rho_b = 1,00 \text{ т/м}^3$, получим:

$$D_{ш} = \sqrt[3]{\frac{0,015}{0,524 \cdot 2,65}} = 0,22 \text{ м};$$

$$M = \frac{0,079 \cdot 2,65 \cdot 0,72^3}{\left(\frac{2,65}{1} - 1\right)^3 \sqrt{1+3^3}} \sqrt{\frac{15}{0,72}} = 0,015 \text{ т}.$$

Подставив в (2) числовые значения параметров волнения, получим

$$D_6 = 1,5 \cdot 0,2 \cdot 0,72 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{7}}{3} + 0,5\right) \times \\ \times \frac{3+1,8}{1,8 \cdot 3 - 1} \cdot \frac{10}{26,5 - 10} = 0,164 \text{ м}.$$

Оценка устойчивости откосов к волновым воздействиям показала, что для их защиты требуется камень большего диаметра (минимум 0,16 м) с толщиной наброски $3D = 0,48 \text{ м}$, что ведет к удорожанию крепления. Поэтому в настоящее время применяется комбинированное крепление откосного типа, состоящее из каменной однослойной отсыпки и укладки под нее вместо песчано-гравийного фильтра синтетического фильтрующего материала типа геотекстиль. Характерным примером широкого применения такого откосного крепления является укрепление берегов водохранилищ Витебской и Полоцкой ГЭС (рис. 9).



Рис. 9. Комбинированное крепление верхнего откоса ограждающей дамбы на водохранилище Витебской ГЭС

Fig. 9. Combined protection of upper slope for embankment dam in reservoir of Vitebsk Hydroelectric Power Station

ВЫВОДЫ

1. На основании обследования сооружений берегозащиты более чем по 100 водохранилищам страны автором проведена оценка современного состояния различных видов креплений с выявлением причин их разрушений и масштабов деформаций.

2. Установлено, что наиболее распространенными являются крепления берегов и откосов в виде железобетонных монолитных либо сборных плит. Определено, что деформации креплений представлены раскрытием межплиточных строительных, температурных и осадочных швов (зарегистрирована ширина раскрытия до 0,35 м), которые развиваются под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и других факторов.

3. Экспериментально установлено, что в результате раскрытия швов плит происходят разрушение и вымыв песчано-гравийной подготовки, образование пазух и ниш с последующей переработкой грунтового откоса, деформацией и разрушением крепления. Физическое моделирование деформаций откосов, защищенных железобетонным креплением с различной шириной раскрытия швов, позволило установить динамику и масштабы развития деформаций откоса при воздействии волнового и уровенно-го режимов.

4. Натурные исследования и лабораторные эксперименты позволили установить эффект самоупрочнения откоса гравелистыми частицами при размыве грунтов с повышенной неоднородностью, который рекомендован для использования в качестве крепления откосов сооружений. Предложен расчет комбинированной берегозащиты, состоящей из каменной отсыпки и синтетических фильтрующих материалов повышенной прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимчук, В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ / В. Л. Максимчук. Киев: Будівельник, 1981. 112 с.
2. Пышкин, Б. А. Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин. Киев: Наук. думка, 1973. 416 с.

3. Сапожников, Г. П. Из опыта эксплуатации креплений верховых откосов земляных плотин и берегов водохранилищ БССР / Г. П. Сапожников, Е. М. Левкевич // Водное хозяйство Белоруссии: респ. межвед. сб. науч. трудов. Минск: Вышэйш. шк., 1977. Вып. 7. С. 97–105.
4. Саплюков, Ф. В. Защита берегов и дамб на водоемах от разрушения ветровыми волнами / Ф. В. Саплюков, Е. С. Ленартович // Мелиорация и водное хозяйство. 1976. № 10. С. 12–18.
5. Левкевич, В. Е. Опыт эксплуатации берегозащитных сооружений в Белоруссии / В. Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. 1991. № 5. С. 66–74.
6. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. Минск: Право и экономика, 2015. 307 с.
7. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2017. 51 с.
8. Левкевич, В. Е. Методические рекомендации по оценке устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич, А. А. Новиков, А. В. Бузук. Минск: Команд.-инж. ин-т МЧС Респ. Беларусь, 2015. 54 с.
9. Михневич, Э. И. Устойчивость русл открытых водотоков / Э. И. Михневич. Минск: Ураджай, 1988. 240 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. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП 45-3.04-170–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 73 с.
12. Михневич, Э. И. Обеспечение устойчивости дамб для защиты от наводнений на реке Горынь / Э. И. Михневич, П. М. Богославчик, Е. А. Володько // Наука и техника. 2013. № 5. С. 34–39.
3. Sapozhnikov G. P., Levkevich E. M. (1977) From Operational Experience on Upper Slopes Anchorages in Earth Dams and Banks of Reservoirs in Belarussian Soviet Socialist Republic (BSSR). *Vodnoe Khozyaistvo Belorussii: Respublikanskii Mezhdvdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Water Management of Belarus. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. (7), 97–105 (in Russian).
4. Saplyukov F. V., Lenartovich E. S. (1976) Protection of Water Reservoir Banks and Dams against their Destruction by Wind Waves. *Melioratsiya i Vodnoye Khozyaistvo* [Melioration and Water Management], (10), 12–18 (in Russian).
5. Levkevich V. E. (1991) Experience in Exploitation of Coastal Protection Structures in Belarus. *Melioratsiya i Vodnoye Khozyaistvo* [Melioration and Water Management], (5), 66–74 (in Russian).
6. Levkevich V. E. (2015) *Dynamic Stability of Water Reservoir Banks in Belarus*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 307 (in Russian).
7. Levkevich V. E. (2017) *Dynamic Stability of Water Reservoir Banks in Belarus*. Minsk: Belarusian National Technical. University. 51 (in Russian).
8. Levkevich V. E., Novikov A. A., Buzuk A. V. (2015) *Methodological Recommendations on Assessment of Stability in Anchorages of Upper Slopes for Earth Dams, Embankments and Water Reservoir Banks in Belarus*. Minsk, Command and Engineering Institute of Ministry for Emergency Situations of Belarus. 54 (in Russian).
9. Mikhnevich E. I. (1988) *Stability in Channels of Open Streams*. Minsk, Uradzhay Publ. 240 (in Russian).
10. Mikhnevich E. I., Levkevich V. E. (2016) Stability of Water Reservoir Banks while Forming Profile of Dynamic Equilibrium in Incoherent Soils. *Melioratsiya* [Melioration], 78 (4), 18–23 (in Russian).
11. *TKP [Technical and Commercial Proposal] 45-3.04-170–2009. Hydraulic Engineering Structures. Rules for Determining Loads and Impacts (Wave, Ice and Ships)*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2011. 73 (in Russian).
12. Mikhnevich E. I., Bogoslavchik P. M., Volodko E. A. (2013) Provision of Dike Slope Stability for Territory Protection Against Goryn River Floods. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 39–44 (in Russian).

Поступила 26.04.2018

Подписана в печать 04.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Maximchuk V. L. (1981) *Rational use and Protection of Reservoir Banks*. Kiev, Budivelnik Publ. 112 (in Russian).
2. Pyshkin B. A. (1973) *Dynamics of Reservoir Banks*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 416 (in Russian).

Received: 26.04.2018

Accepted: 04.07.2018

Published online: 30.11.2018