

4. Михневич, Э.И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э.И. Михневич, В.Е. Левкевич // Мелиорация. – 2016. – № 4 (78). – С. 18–23.
5. Максимчук, В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев : Будівельник, 1981. – 112 с.
6. Левкевич, В.Е. Некоторые вопросы гидрологии водооагилиц ГЭС Белорусской ССР // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – Минск : Вышэйшая школа, 1981. – Вып. 11. – С. 22–27.
7. Об утверждении Государственной программы строительства в 2011 - 2015 годах гидроэлектростанций в Республики Беларусь : Постановление Совета министров Республики Беларусь 17 декабря 2010 г. N 1838.
8. Реализация мероприятий по объекту «Строительство Витебской ГЭС на реке Западная Двина. Мероприятия по ложу водохранилища : ОВОС // ЦНИИКИВР. – Минск, 2015. – 129 с.
9. Кондратьев, Н.Е. Расчеты береговых перестроений на водохранилищах : практ. рук-во / Н.Е. Кондратьев. – Л. : Гидрометеоздат, 1960. – 64 с.
10. Пышкин, Б.А. Динамика берегов водохранилищ / Б.А. Пышкин. – Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.
11. Левкевич, В.Е. Фоновый прогноз переработки берегов водохранилищ «Дубровское2 и «Раубичи» на р. Усяже / В.Е. Левкевич, Н.Ф. Самончик // Мелиорация и водное хозяйство. – Минск : НТИ, 1989. – Вып. 12. – С. 12–14.
12. Оценка воздействия на окружающую среду Полоцкой ГЭС на р. Зап. Двина (ОВОС) // ЦНИИКИВР. – Минск, 2002. – 52 с.

Материал поступил в редакцию 12.03.2018

#### LEVKEVICH V.E. "Background" forecast for processing the natural shores of the reservoirs of the Grodno, Vitebsk and Polotsk HPPs

Designing and construction of modern hydroelectric complexes which include: a hydroelectric power station, dam, navigable sluice, earth dam, reservoir, etc. require detailed forecasting of their impact on adjacent territories. Assessment issues are usually considered in accordance with regulatory requirements and provide for the study of the impact of the reservoir on the development of various processes in the coastal zone. For the objectivity of the forecast, the author suggests that it be carried out in two stages: the first in the form of a "background" enlarged forecast and the second, in the form of a detailed one, after commissioning the facility in 5 years. Such an approach will allow to take into account all trends in the development of coasts and coastal processes and develop proposals for shore protection, if necessary.

УДК 519.216.3: 627.8

Левкевич В. Е.

### БЕРЕГОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ БЕЛАРУСИ, ИХ СОСТОЯНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

**Введение.** Для защиты размываемых берегов водохранилищ, а также верховых откосов дамб и плотин, проводятся берегозащитные мероприятия и строятся берегозащитные сооружения, которые по характеру взаимодействия с волновым потоком и потоком наносов делятся на активные и пассивные.

*Активные* берегозащитные сооружения в республике представлены: волноломами, молами различных конструкций, а также искусственными намытыми или отсыпанными пляжами и биологическим креплением откосов, которые изменяют структуру волнового потока и стокового течения в береговой зоне [1–3].

К *пассивному* типу сооружений [4–6] следует отнести волнобойные стенки, дамбы обвалования с закрепленным верховым (со стороны акватории водохранилища) откосом, одежды естественных береговых склонов (каменная наброска, мощение, сборное железобетонное или монолитное бетонное, асфальтобетонное крепление и синтетическое покрытие) и откосов напорных сооружений.

В настоящей работе приведены результаты исследований оценки состояния эксплуатируемых берегозащитных сооружений различного типа, а также возможности крепления берегов и откосов альтернативной берегозащитой в виде откоски из крупнофракционных частиц (валунов, гравия, гальки), образующейся на поверхности отмели при размыве несвязных грунтов с повышенной неоднородностью.

**Обследование креплений берегов и откосов** более чем на 100 водных объектах Беларуси показало, что большинство из них имеют серьезные повреждения. 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 период 2013–2016 гг., оценена в пределах 110 км что составляет около 50 % протяженности всех креплений.

Берегозащитные сооружения активного типа в виде оградительных волноломов эксплуатируются на Вилейском и Заславском водохрани-

лищах. Волноломы, эксплуатируемые на этих водных объектах более 45 лет, представляют собой сооружения откосного типа в виде безнапорных дамб, отсыпанных из грунта с защитным железобетонным покрытием откосов. Заложения откосов составляют 1:3, реже 1:2,5.

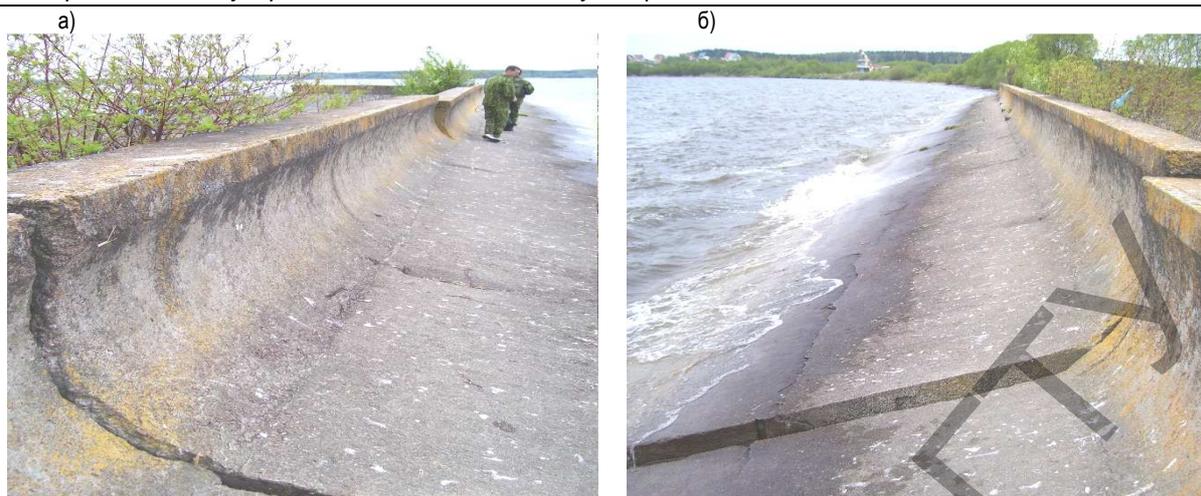
*Берегозащитные волноломы* плавающего типа применялись в порядке эксперимента на Любанском и Солигорском водохранилищах [1, 7]. На некоторых водохранилищах (рыбхозы – Белое, Тремля, Волма и др.) применялись подводные волноломы в виде тонких стенок [1, 7].

Наряду с волноломами в качестве берегозащитного сооружения на водохранилищах применяются *молы*. Важным фактором, определяющим развитие деформаций этих сооружений, является отсутствие должной эксплуатации, что ведет к разрушению сооружений берегозащиты (рисунок 1).

*Искусственные пляжи* как сооружения инженерной защиты «активного» типа наиболее часто применяются в практике берегозащиты. Сооружения этого типа построены более чем на 40 водохранилищах страны (водохранилища – Заславское, Криницы, Дрозды, Волчковичи, Солигорское, Дубровское, Вяча и др.) и хорошо себя зарекомендовали в эксплуатации. Общая их протяженность по всем водохранилищам страны, по оценке автора, составляет около 150 км [1–4].

Из *биологических типов креплений берегов и откосов* дамб и плотин в условиях Беларуси зарекомендовали себя посев трав или же одерновка откосов при длине разгона волны до 500 м и посадка ивы (водохранилища – Коммунар, Загатье, Малые Автюки). Посадка ивы применяется для закрепления надводной части откосов. Обследования показали, что на ряде объектов были обнаружены обрушение и вымыв грунта и растительности (объекты – Белое, Тремля, Альба и др.). На водохранилище Красная Слобода кроме посадки ивы применялись посадки многолетнего дальневосточного риса [2, 9].

Дамбы обвалования являются самым распространенным типом берегозащитных сооружений в Беларуси и наиболее часто используются в качестве защитного мероприятия от затопления на водохранилищах руслового типа (водохранилища – Вилейское, Заславское, Дрозды, Солигорское, Красная Слобода) или же при строительстве водных объектов наливного типа (водохранилища – Автюки, Загатье, Смолевичское, Коммунар и т. д.). Высота дамб обвалования редко превышает 5–7 м.

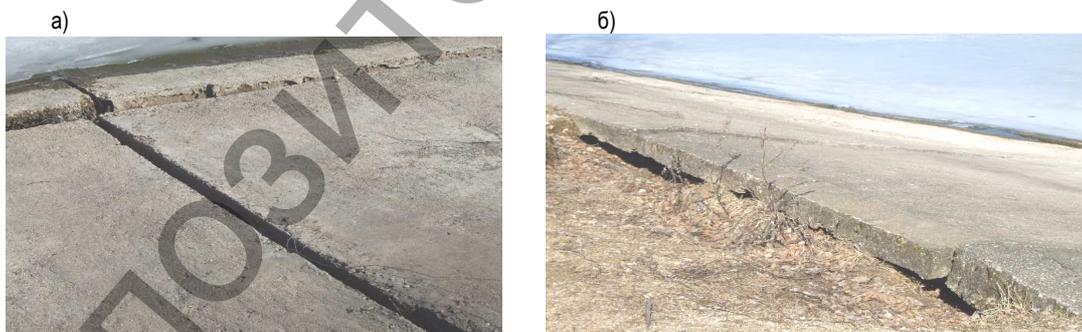


а) восточная часть мола; б) западная часть мола

**Рисунок 1** – Берегозащитный мол. Заславское водохранилище

**Таблица 1** – Значения деформаций верховых откосов дамб и плотин Полесья

Название водохранилища	Длина участка размыва, м	Объем переработки верхового незакрепленного откоса $Q_t$ , м <sup>3</sup> /м пог.	
Краснослободское	700	5,90	2,26
Солигорское	4500	6,20	2,22
Локтынш	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



а) осадочные швы; б) температурные швы

**Рисунок 2** – Повреждение железобетонного крепления откосов

На сооружениях распластанного профиля в период эксплуатации происходят местные размывы верховых откосов, обусловленные различными причинами. Так, наблюдения и натурные исследования, выполненные автором по 18 водохранилищам [1, 2], показали, что:

- развитие деформаций верховых откосов дамб и плотин обусловлено наличием в принятых расчетных схемах и зависимостях объективных неточностей;
- недостаточно полно учитываются условия волнообразования и уровня режима;
- в исходных данных и материалах изысканий не всегда достоверно представлена информация о грунтовых условиях;
- возможны технологические отклонения при строительстве сооружений.

Величина деформаций откосов в ряде случаев достигает значительных величин: линейная переработка откосов – до 24,20 м; объем

размывов – до 4,25 м<sup>3</sup>/м пог. В таблице 1 приведены сведения о масштабах размывов и деформаций верховых откосов и дамб и плотин [9].

Профиль дамб обвалования принимается распластанного типа с уположенным верховым откосом и отсутствием крепления или же обжатой формы с одеждой крутостей с бетонным или железобетонным покрытием верхового откоса [2, 3], реже каменным, асфальтобетонным или же комбинированным.

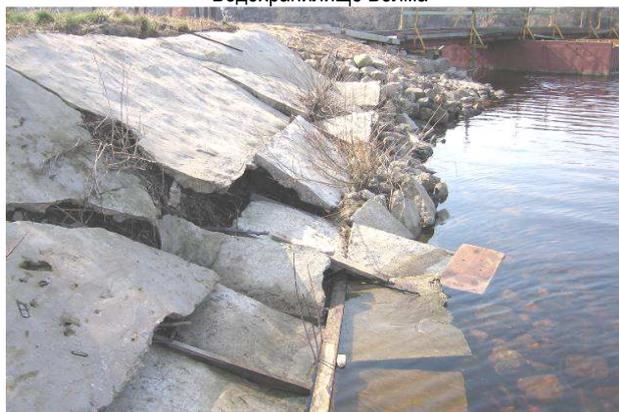
В соответствии с [7–8] монолитные крепления выполняются из плит толщиной до 20 см на слое песчано-гравийной подготовки толщиной 10–15 см. Плиты разрезаются температурно-осадочными швами по всей высоте откоса (рисунок 2). Сборно-монолитные крепления выполнены из отдельных плит размерами 4,0x1,75 м с последующим омоноличиванием швов (Солигорское водохранилище). Толщина плит крепления при этом составляет 15–20 см, а гравийной подготовки – до 20 см.



Водохранилище Волна



Водохранилище Чигиринское



Водохранилище Лепельское



Водохранилище Княжеборское



Водохранилище Любанское



Заславское водохранилище

**Рисунок 3** – Характерные разрушения железобетонных креплений откосов и берегов

Обследование объектов с различными типами креплений показало [1–3], что одной из причин образования повреждений бетонных и железобетонных креплений является некачественное уплотнение швов и гравийной подготовки, что в итоге приводит к выносу грунта из-под плит и их последующему разрушению (рисунок 2).

Каменные покрытия типа мостовой при небольших разгонах волны 0,4–0,6 км являются надежной защитой откосов. В случае разгона волны более 1,5–2,0 км верховой откосы, закрепленные каменной мостовой, могут получить локальные разрушения (Осиповичское водохранилище). На рисунке 3 представлены типичные примеры повреждения крепления берегов и откосов дамб и плотин, наблюдаемые в условиях Беларуси, которые получены и зарегистрированы автором при натурном обследовании ряда водохранилищ страны.

В таблице 2 приведены наиболее часто встречаемые виды деформации креплений, а также причины их возникновения.

Изучение совместного воздействия волнения, а также колебания уровней на устойчивость плит креплений проведено в волновом лотке гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета (БНТУ) на размываемой модели откоса,

имеющего заложение 1:3 с креплением из железобетонных плит толщиной 2,2 см и открытыми швами. Моделирование выполнялось в масштабе 1:10. Опыты, проведенные совместно с аспирантом А.В. Бузуком, 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.

На рисунке 4 приведены графики вида  $Q_t = f(b_{шва})$ , 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 [3–10].

На этой же лабораторной установке автором совместно с к. т. н. В.В. Кобыком [11] исследовались деформации береговых незакрепленных склонов при совместном воздействии волн различной высоты в условиях изменения колебания уровней при трансформированном режиме эксплуатации водохранилища.

Таблица 2 – Виды деформаций креплений откосов и причины их возникновения

Название водохранилища (тип и вид регулирования)	Амплитуда колебания уровней, м	Нарушения устойчивости сооружений	
		Тип деформаций	Примечание
Заславское (русловое; многолетнее)	1,2	Просадка плит берегоукрепительных сооружений верховых напорных откосов	На незащищенных берегах ярко выражено ледовое воздействие: имеются перемещения грунта под воздействием льда
Острошицкий Городок (русловое; сезонное)	0,5	Разрушение монолитного крепления в приплотинной части водохранилища	Протекает процесс абразии на участках, примыкающих к берегоукрепительным сооружениям
Лошанское (русловое; сезонное)	1,0	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса водохранилища	Происходит постепенный вынос мелких грунтовых фракций из образовавшихся швов в берегоукрепительном сооружении
Любанское (русловое; сезонное)	1,3	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса водохранилища	Происходит постепенный вынос мелких грунтовых фракций из образовавшихся швов в берегоукрепительном сооружении
Локтыши (русловое; сезонное)	1,0	Разрушение заполнения швов плит крепления в верхнем и нижнем бьефе водохранилища	Наблюдается вынос гравия и грунта из-под сооружения берегозащиты в нижнем бьефе и его просадка
Княжеборское (русловое; сезонное)	0,2	Вынос грунта из-под монолитного берегоукрепительного сооружения, образование трещин и просадок	Наблюдается вынос гравия и грунта из-под сооружения берегозащиты и образование пустот
Млынок (русловое; сезонное)	0,3	Проседание плит берегоукрепительных сооружений и непосредственно самой конструкции автоматического водосброса	Разрушение материала гидроизоляции под автоматическим водосбросом, значительное увеличение фильтрации в нижний бьеф водохранилища, вынос грунта, и, как следствие, авария на искусственном водном объекте
Лепельское (озерное; сезонное)	1,1	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса водохранилища, разрушение асфальтного берегоукрепительного сооружения, обрушение сооружения берегозащиты вертикальная стенка	Происходит постепенный вынос мелких грунтовых фракций из образовавшихся швов в берегоукрепительных сооружениях
Тетеринское (русловое; сезонное)	0,7	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса водохранилища	Наблюдается вынос гравия и грунта из-под сооружения берегозащиты и образование пустот

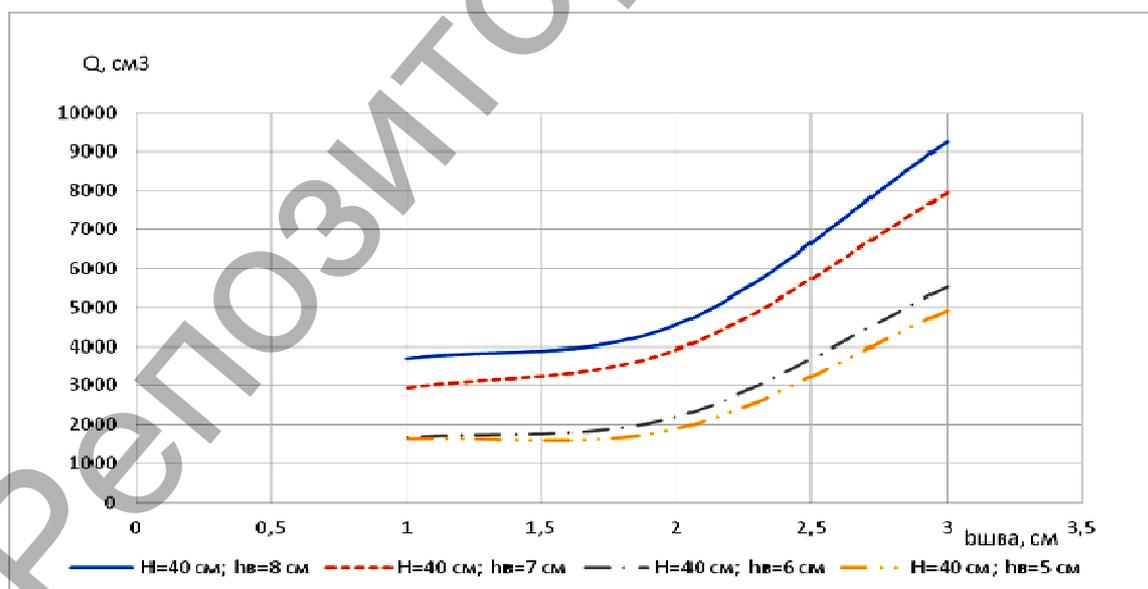


Рисунок 4 – Зависимость объема вымытого грунта от ширины раскрытия швов при  $H=0,35 - 0,40$  м и  $h_c=0,05-0,08$  м

Модель изготавливалась из среднезернистого несвязанного песка с коэффициентом неоднородности  $\eta = 1,2-2,4$ . Интенсивность переработки берегового склона  $S = f(t)$  при различных высотах волн показана на рисунке 5. Установлено, что изменение уровня режима (сработка или наполнение) при постоянных высотах волн приводит к изменению интенсивности и масштабов линейной переработки тела модели.

Опыт эксплуатации водохранилищ Белоруссии и подпорных сооружений показал, что берега водоемов и незакрепленные откосы дамб и плотин подвергаются абразии – переработке, в результате которой возникают деформации значительной величины (рисунок 6). Наблюдениями установлено, что одним из факторов, определяющих интенсивность, масштабы и динамику процесса переработки, является структура размываемой породы и ее физико-механические характеристики: неоднородность и гранулометрический состав [1, 11, 12].

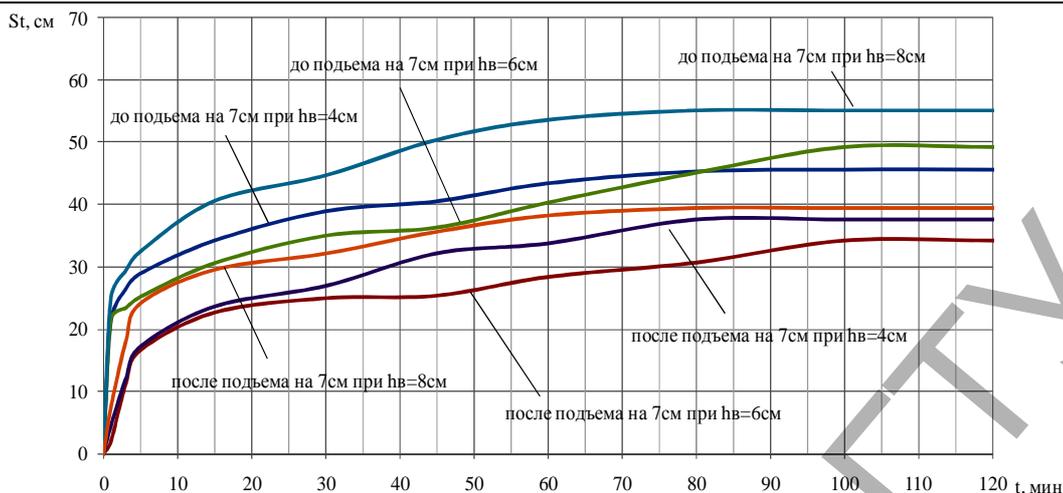


Рисунок 5 – График зависимости  $S = f(t)$ : до и после поднятия уровня воды на 7 см при высотах волн 4, 6, 8 см



Рисунок 6 – Вилейское водохранилище. Правый берег

Наблюдения, выполненные автором на ряде водохранилищ страны, позволили установить, что при абразии береговых склонов, сложенных четвертичными отложениями, образуются береговые отмели, покрытые валунами, галькой и др. крупнофракционным материалом, устойчивым к воздействию волн и течений. Аккумулированный в береговой зоне валунно-галечниковый материал образует на поверхности отмели естественную «самоотмостку», препятствующую ее разрушению и способствующую формированию профиля равновесия в более короткие сроки. В результате возникновения «самоотмостки» поверхность береговой отмели «бронирована» слоем наиболее крупных фракций за счет выноса находящихся между ними более мелких частиц (рисунок 7).

Натурными наблюдениями установлено, что одним из факторов, влияющих на динамическую устойчивость берегов в условиях водохранилищ Беларуси, является неоднородность размываемого грунта. Этот показатель может использоваться при торможении процес-

са переработки и дальнейшей стабилизации деформаций берега.

Исследования образования самоотмостки выполнялись в гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета в волновом лотке длиной 12,0 м, шириной 0,32 и высотой 0,7 м, оборудованном волнопроизводящей установкой типа «качающийся щит» (рисунок 8).

Лабораторные исследования, проведенные автором в лаборатории БНТУ, позволили изучить механизм закрепления поверхности отмели в зависимости от неоднородности материала и оценить скорость процесса переработки и формирования профиля равновесия. В качестве основного «базового» грунта, образующего тело модели, использовался 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 различный средний диаметр частиц  $D_{50}$  и коэффициент неоднородности  $\eta_0$  при различном содержании крупнозернистых включений: 10, 25, 50 и 75 % (таблица 3). 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 А.С. Офицерову, Ж. Буссинеску и В.Л. Максимчуку [4, 5]. Моделирование откоса проводилось без искажений линейного масштаба, как для условий галечно-гравийных грунтов. Всего было проведено 18 серий опытов. В качестве «оптимального» состава размываемого грунта, при котором наблюдался наибольший берегозащитный тормозящий эффект, была экспериментальным путем определена смесь, имеющая содержание гравелистых частиц равно  $P = 25$  %.

Натурные наблюдения автора показали, а лабораторные эксперименты подтвердили, что возможно образование двух основных типов профиля, имеющего покрытие из крупнофракционного материала: первый – при содержании (насыщении) крупных фракций более 25%, второй – при насыщении грунта крупными фракциями менее 25 % (рисунок 9).



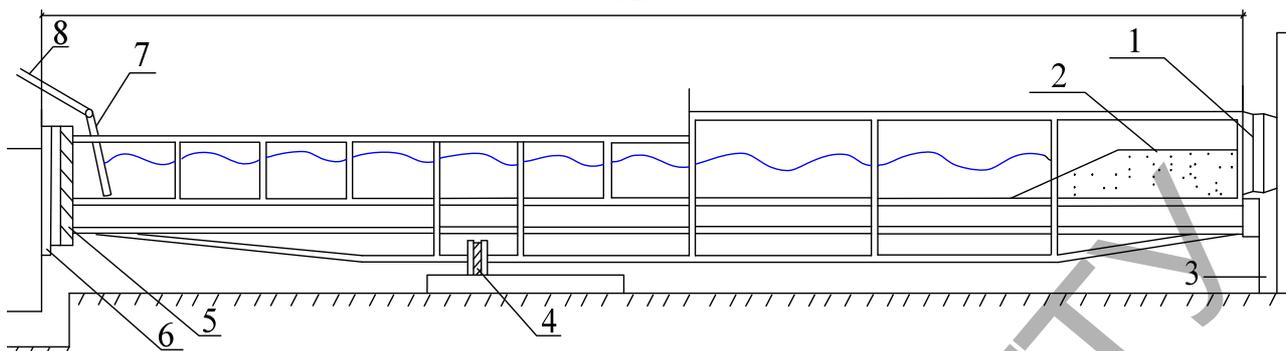
а) – Заславское водохранилище



б) – Дубровское водохранилище

Рисунок 7 – Образование естественной отмостки

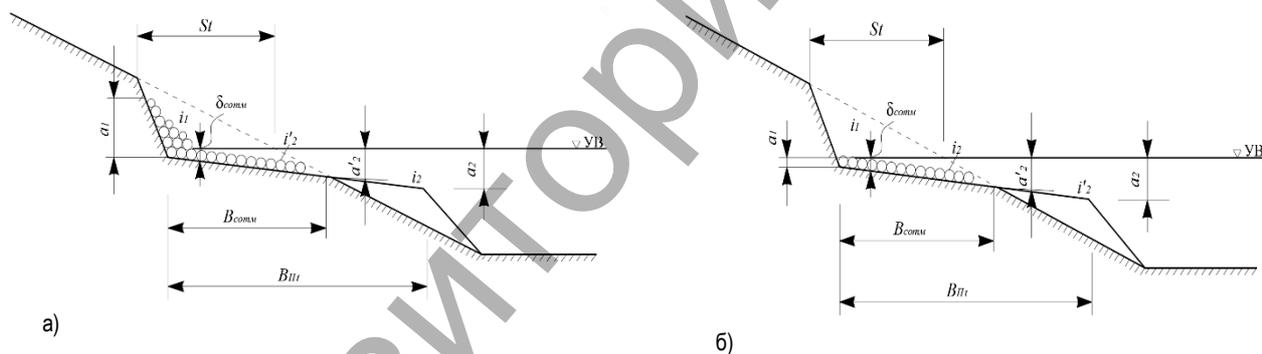
12 м



1 – заглушка; 2 – модель; 3 – опора; 4 – домкрат; 5 – затвор-жалюзи; 6 – отпусной затвор; 7 – волновой щит; 8 – тяга к редуктору  
**Рисунок 8** – Схема волнового лотка

**Таблица 3** – Состав грунтовой смеси, укладываемой в тело модели

№ опыта	Тип смеси	Фракционный состав смеси, мм	$D_{50}$ , мм	$\eta_0$
4	Однокомпонентная	(1,0 + 2,0)	1,5	5,2
6		(5,0 + 10,0)	7,5	4,5
5	Двухкомпонентная	(2,0 + 5,0) и (10,0 + 15,0)	8,0	5,6
9		(10,5 + 15,0) и (15,0 + 20,0)	15,0	6,3
2	Трехкомпонентная	(0,1 + 0,25, 1,0 + 2,0, 2,0 + 5,0)	2,57	6,0
2	Четырехкомпонентная	(2,0 + 5,0, 5,0 + 10,0, 10,0 + 15,0, 15,0 + 20,0)	10,2	6,0



а – профиль с призмой  $25\% < P < 50\%$ ; б – профиль без призмы  $10\% < P < 25\%$

**Рисунок 9** – Варианты образования профиля равновесия в зависимости от содержания крупнофракционного материала в грунте [12]

В результате лабораторных опытов получен ряд зависимостей для расчета отдельных элементов профиля (таблица 4). Определено, что наибольший берегозащитный эффект (при минимальной величине деформаций откоса) дает отсыпка смеси оптимального состава через время  $T = 0,25 T_k$ , где  $T_k$  – срок стабилизации процесса переработки.

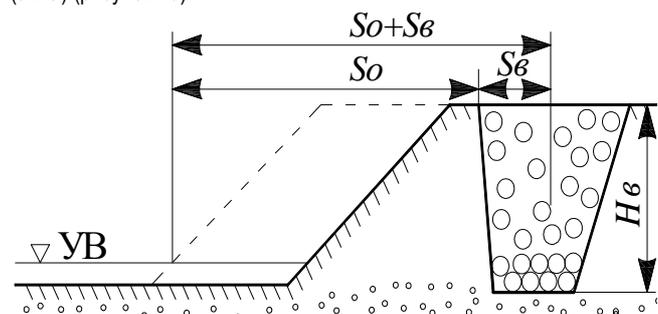
Автором был разработан способ берегозащиты в виде искусственного аналога естественной отсыпки, достоинствами которого являются простота реализации, возможность полной механизации, снижение удельной стоимости крепления.

Суть предложенного способа защиты заключается в следующем [1, 2, 12]. На естественных берегах, по прогнозу подверженных значительной переработке средствами механизации (экскаватор типа «драглайн» или «обратная лопата»), вдоль уреза воды выполняется вертикальная врезка трапециевидального либо прямоугольного сечения (рисунок 10).

После изъятия грунта из выемки ее объем заполняется в несколько слоев крупнофракционным материалом: нижняя часть – камнем, середина – гравийной смесью, верхняя – естественным грунтом с повышенной неоднородностью (коэффициент неоднород-

ности,  $\eta_0 \geq 5$ ). Желательно, чтобы врезка заполнялась песчано-гравийной смесью оптимального состава.

Расстояние от уреза до оси врезки определяется по результатам прогнозных расчетов линейных переработки [1, 2]. Глубина врезки принимается равной отметке уровня мертвого объема водоема (УМО) (рисунок 10).



**Рисунок 10** – Защита размываемых берегов, откосов дамб и плотин путем создания искусственной самоотсыпки

Таблица 4 – Зависимости для расчета элементов профиля равновесия с креплением откоса

Тип профиля с самоотмосткой	Элемент профиля	Расчетная зависимость*
Самоотмостка с призмой на урезе при $25\% \leq P_{ep} \leq 50\%$	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = (1,5 - 2,0) \delta_{отм}$
	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 $10\% \leq P_{ep} \leq 25\%$	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = \delta_{отм}$
	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	$i_2 = 0,60 i_2'$

\*Примечание:  $a_1, a_2, a_2'$  – пределы размыва, глубина в конце самоотмостки, м;  $\delta_{отм}$  – толщина слоя отмостки, м;  $h_{1\%}$  – высота волны, м;  $\lambda_0$  – относительная длина волны, м;  $D_{50}, d_{50}$  – средневзвешенная крупность частиц соответственно размываемого грунта и частиц самоотмостки, м;  $\eta_0$  – коэффициент неоднородности размываемого грунта;  $i_0, i_1, i_2$  – уклоны исходного профиля и поверхности элементов самоотмостки соответственно

Незакрепленный берег (откос) в результате переработки достигает выполненной врезки, которая, разрушаясь под действием берегообразующих (гидрологических) факторов: ветрового волнения, течений, колебания уровней и т. д., образует в береговой зоне самоотмостку из крупных частиц – валунов, гравия, гальки, которая ведет к торможению процесса абразии [1, 2, 12]. При развитии деформаций исходного откоса под действием ветрового волнения и других факторов профиль приобретает формы, изображенные на рисунке 11.



Рисунок 11 – Искусственная самоотмостка на Заславском водохранилище

**Заключение.** Как показали расчеты, крепление откосов данным способом ориентировочно в 10 раз экономичнее, чем отсыпка из дорогостоящего гравия и камня. В отличие от традиционных типов креплений откосов гравием или камнем, которые не всегда эффективно препятствуют деформациям и требуют от службы эксплуатации постоянной подсыпки грунта в местах локальных размывов,

применение данного способа позволяет надежно закреплять и стабилизировать профиль переработки в течение 1–2 сезонов [12]. Практика показала, что защита размываемых откосов дамб и плотин на водохранилищах предложенным способом, с учетом использования методики расчета деформаций, дает экономический эффект около 22,0–27,0 тыс. руб. на 1 км пог. закрепляемого откоса (ориентировочная денежная оценка на период осени 2017 г.). Данный способ крепления откосов был использован в Беларуси на Заславском водохранилище и других водных объектах страны.

На основе анализа и обобщения многочисленных природных и лабораторных исследований автором были разработаны основы торможения деформации берегов проектируемых водохранилищ без применения дорогостоящих инженерных конструкций [1, 2, 12]. В основу методики торможения и стабилизации процесса переработки берегов положены закономерности формирования профиля равновесия с самоотмосткой.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Левкевич, В.Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.
2. Левкевич, В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси В.Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.
3. Левкевич, В.Е. Основные результаты стационарных геоморфологических исследований абразионно-эрозионных процессов на водохранилищах БССР / В.Е. Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство : сб. науч. ст. – Минск : Выш. шк., 1988. – № 17. – С. 44–49.

- Максимчук, В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев : Будівельник, 1981. – 112 с.
- Пышкин, Б.А. Динамика берегов водохранилищ / Б.А. Пышкин. – Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.
- Вайтман, В.В. Моделирование переформирования поперечного профиля пляжа, сложенного неоднородными наносами / В.В. Вайтман, И.Г. Кантаржи // Обзорение прикладной и промышленной математики. – Т. 13, Вып. 6. – С. 1060–1062.
- Сапожников, Г.П. Из опыта эксплуатации креплений верховых откосов земляных плотин и берегов водохранилищ БССР / Г.П. Сапожников, Е.М. Левкевич // Водное хозяйство Белоруссии. – 1977. – Вып. 7. – С. 97–105.
- 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.
- Левкевич, В.Е. Опыт эксплуатации берегозащитных сооружений в Белоруссии / В.Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. – М., 1991. – № 5. – С. 66–74.
- 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 // Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – 54 с.
- Кобяк, В.В. Прогноз абразионных процессов на водохранилищах с трансформированным уловленным режимом : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.23.07 / В.В. Кобяк ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2013. – 22 с.
- Левкевич, В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.07 / В.Е. Левкевич ; Белорус. национальный техн. ун-т. – Минск, 2017. – 51 с.

Материал поступил в редакцию 12.03.2018

#### LEVKEVICH V.E. Coastal structures on the reservoirs of Belarus, their condition and operation

The article presents the results of field observations of coastal protection structures of various types used in the reservoirs of Belarus. The estimation of their condition and operational possibilities is given, the reasons and the factors influencing stability of fastenings are given. A method of bank protection developed by the author on the basis of the effect of the formation of a "self-peeling" formed during the destruction of the shore is proposed. folded non-cohesive soils with increased heterogeneity.

УДК 625.72+624.131.23

Козловский Д. С., Кравченко С. Е.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗАИЛЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ДРЕН И ПЕСЧАНЫХ ПРОСЛОЕК В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

**Введение.** Как показывает практика, в дорожном строительстве достаточно актуальна проблема протекания суффозных процессов при неглубоком залегании грунтовых вод, высокой интенсивности атмосферных осадков, применении слабых грунтов (торф и заторфованные грунты, илы, сапропели, глинистые грунты с коэффициентом консистенции свыше 0,5) для устройства земляного полотна или при наличии слабых грунтов в основании насыпей.

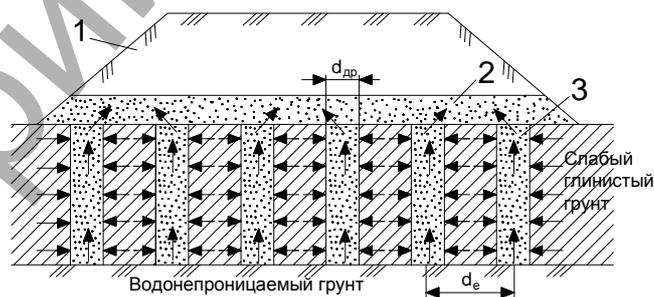
На сегодняшний день существуют различные способы искусственного улучшения основания и земляного полотна, подразумевающие под собой совместную работу слабых или глинистых водонасыщенных грунтов с песчаными грунтами. Сущность проблемы в том, что на границе контакта глинистый – песчаный грунт и в песчаном слое образуются прослойка из пылевато-глинистых частиц.

Одним из наиболее практичных и простых методов искусственного улучшения основания является предварительное обжатие грунтов давлением, равным или большим давления от сооружения. Однако время уплотнения водонасыщенных грунтов в основании транспортных сооружений очень велико, что объясняется тем, что осадка водонасыщенного грунта может произойти только после отжатия из грунта воды, заполняющей поры.

**Методика исследования.** Ускорения процесса уплотнения можно достичь устройством вертикальных песчаных дрен [1]. В результате этого путь фильтрации, для отжимаемой воды из уплотняемого грунта уменьшается, и время уплотнения резко сокращается (рис. 1).

Однако при использовании песчаных дрен в основаниях или насыпях автомобильных дорог из слабых грунтов характерно проявляются процессы заиления, из-за передвижения водой взвешенных пылевато-глинистых частиц грунта к месту фильтрования. Отсюда диаметр дрен ( $d_{др}$ ) необходимо назначать с учетом возможного заиления части дрены при фильтрации [1].

При больших глубинах залегания (18–20 м) сильно сжимаемых пылевато-глинистых грунтов, рыхлых песков, заторфованных грунтов вместо песчаных дрен целесообразно применять песчаные сваи.



1 – земляное полотно; 2 – песчаная подушка; 3 – вертикальные песчаные дрены (стрелками показано движение отжимаемой воды);  $d_{др}$  – диаметр песчаной дрены;  $d_e$  – расстояние между дренами  
**Рисунок 1** – Схема устройства вертикальных песчаных дрен в основании земляного полотна

Анализ имеющихся исследований [1] показал, что процессы заиления песчаных грунтов наиболее активно протекают в первые 1–2 года после возведения конструкции, что существенно ограничивает применимость песчаных прорезей, дрен и свай.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Для определения времени работы песчаной дрены при наиболее характерных гидрогеологических условиях Брестской области использовался прибор для определения коэффициента фильтрации КФ-00М [2] (рис. 2). В качестве материала, заполняющего дрена, использовался песок крупный (плотность частиц  $\rho_s=2,65 \text{ г/см}^3$ ). Результаты определения гранулометрического состава грунта ситовым методом [3] представлены в таблице 1.

Козловский Денис Станиславович, старший преподаватель кафедры геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Кравченко Сергей Егорович, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 150.