

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЕРЕГОЗАЩИТЫ И ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЕЛАРУСИ

УДК [574 + 504] (576)

Резюме. В статье приведены результаты натурных наблюдений за берегозащитными сооружениями откосного типа, применяемыми на водохранилищах Беларуси. Определены наиболее распространенные крепления берегов и откосов – железобетонные монолитные либо сборные плиты. Опытным путем выявлено: в результате раскрытия швов плит происходит разрушение и вымыв песчано-гравийной подготовки, образование пазух и ниш в теле подпорного сооружения, что ведет к значительной переработке грунтового откоса. Натурные исследования, а также лабораторные эксперименты позволили установить возможность укрепления откоса самоотмосткой из гравелистых частиц искусственным путем посредством отсыпки грунта с повышенной неоднородностью, имеющего крупнофракционные включения. Показана экономическая эффективность нового типа крепления.

Ключевые слова: водохранилища, сооружения откосного типа, крепления, несвязный грунт с повышенной неоднородностью, берегозащита, берегоукрепление, крупнофракционный материал, самоотмостка.



Виктор Левкевич,
профессор кафедры
водоснабжения
и водоотведения Белорусского
национального технического
университета, доктор
технических наук, доцент



Надежда Батова,
завсектором эколого-
экономических проблем
Института экономики
НАН Беларуси, кандидат
экономических наук

Водоохранилища – один из основных и наиболее сложных элементов водохозяйственного комплекса Республики Беларусь. Возведенные на базе рек и озер, наряду с положительным эффектом они оказывают и отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Водохозяйственное строительство, связанное с созданием сложных природно-технических и хозяйственных комплексов в виде искусственных водных

объектов – водохранилищ, ведет к развитию опасных явлений, к которым относится абразия (переработка-разрушение) естественных берегов [1–5] (рис. 1).

В результате этого процесса происходит изъятие сельскохозяйственных земель и лесных угодий из оборота, разрушение селитебных территорий, нарушение условий жизнедеятельности населения, что наносит значительный ущерб народному хозяйству. Основой обеспечения безопасности жизни людей, проживающих вблизи водо-

хранилищ, является достоверный прогноз абразионных процессов и определение современных, эффективных с точки зрения экономики, инженерных мероприятий по берегоукреплению [3–5]. Существующие же способы последнего и методы прогноза не всегда позволяют назначить адекватные меры по комплексной берегозащите [3, 6, 7].

Важность данной проблемы подтверждена активно проводимыми в Беларуси реконструкцией, модернизацией и строительством новых гидроузлов и водохранилищ гидроэлектростанций (ГЭС) энергетического назначения. В Беларуси эксплуатируется более 150 водохранилищ (водоемов, имеющих полный объем более 1,0 млн м³), протяженность берегов которых составляет более 1500 км [1–4]. Суммарная же длина берегов водохранилищ, подверженных разрушению, – около 350 км. По данным натурных обследований, проведенных в период 2013–2017 гг., протяженность поврежденных и разрушенных берегоукрепительных конструкций и сооружений оценена в пределах 110 км, что составляет около 50% длины всех креплений [4, 5].

В соответствии с Государственной программой развития гидроэнергетики в стране строятся каска-



Рис. 1. Вилейское водохранилище. Переработка правого берега (Фото В. Левкевича, 2016 г.)

ды водохранилищ гидроэнергетического назначения на реках Неман и Западная Двина [8]. На первой уже возведена Гродненская ГЭС (проектируется Немновская ГЭС), а на второй – Витебская и Полоцкая ГЭС (в планах – Бешенковичская ГЭС) (рис. 2, 3). Перечисленные гидроузлы имеют водохранилища значительной протяженности, с малой площадью водного зеркала и относятся к русловому, так называемому каньонному типу с глубоким врезом в речную долину с высокими берегами.

На долю водохранилищ энергетического назначения (с учетом существующих, реконструируемых, модернизируемых и строящихся ГЭС) приходится более 45% всего водохранилищного фонда страны [4].

Предварительные прогнозные расчеты показали, что протяженность берегов, подверженных активной переработке, только на водохранилище Витебской ГЭС составит более 12 км, а на водохранилище Гродненской ГЭС – около 10 км. В связи с этой важной для Беларуси хозяйственной проблемой возникла необходимость обобщения накопленного фактического материала и результатов исследований для подготовки научно обоснованных предложений по берегозащите нового типа. Основой разработки перспективного способа крепления послужили материалы собственных многолетних натурных наблюдений и лабораторных экспериментов, фондовые материалы Белорусского



Рис. 2. Гродненская ГЭС



Рис. 3. Витебская ГЭС



Рис. 4. Полоцкая ГЭС

национального технического университета, Белорусского государственного университета, Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов, Института мелиорации, Белгипроводхоза, а также технико-экономические расчеты, проведенные в Институте экономики НАН Беларуси в рамках государственных программ научных исследований.

В качестве защиты от развития эрозионных процессов в практике отечественной берегозащиты применяются стандартные крепления откосного типа различных конструкций – бетонные или железобетонные [3–7] (рис. 4).

Обследование в различных регионах страны (Поозерье, центральная часть, Полесье) водных объектов с различными типами креплений показало, что одна из важнейших причин снижения сроков эксплуатации и надежности бетонных и железобетонных креплений – образование повреждений, вызванное некачественными уплотнением швов и гравийной подготовкой на стадии строительства. Со временем это приводит к деформациям откосов волновым потоком под плитами при различных положениях уровня воды, а также к выносу грунта из-под плит и последующему их разрушению (рис 5).

Наблюдения за рядом водохранилищ страны позволили выявить уникальный природный эффект: при переработке береговых склонов, сложенных несвязными грунтами с повышенной неоднородностью, формируются береговые отмели, покрытые валунами, галькой и другим крупнофракционным материалом, устойчивым к воздействию волн, колебанию уровней, подвижкам ледового покрова и т.д. [3–5]. Валунно-галечниковый материал за счет выноса из слоя наиболее крупных фракций мелких частиц, находящихся между ними, образует естественную самоотмост-

ку на поверхности отмели (рис. 6), которая препятствует разрушению последней.

Лабораторные исследования образования самоотмостки, проведенные в гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета, позволили изучить механизм закрепления поверхности отмели в зависимости от неоднородности материала и оценить скорость процесса переработки и формирования профиля равновесия. Эксперименты показали, а натурные наблюдения подтвердили, что возможно возникновение двух основных типов профиля, имеющего покрытие из крупнофракционного материала ($P_{гр}$): с содержанием последнего более 25% либо менее 50% от объема размываемого грунта (рис. 7).

В результате лабораторных опытов получен ряд расчетных зависимостей для определения отдельных элементов профиля берега, закрепляемого самоотмосткой



Рис. 5. Характерные разрушения железобетонных креплений откосов водохранилищ: А – Заславского; Б – Чигиринского; В – Лепельского; Г – Любанского



Рис. 6. Образование естественной самоотстки на водохранилищах Беларуси: А – на Заславском; Б – на Дубровском

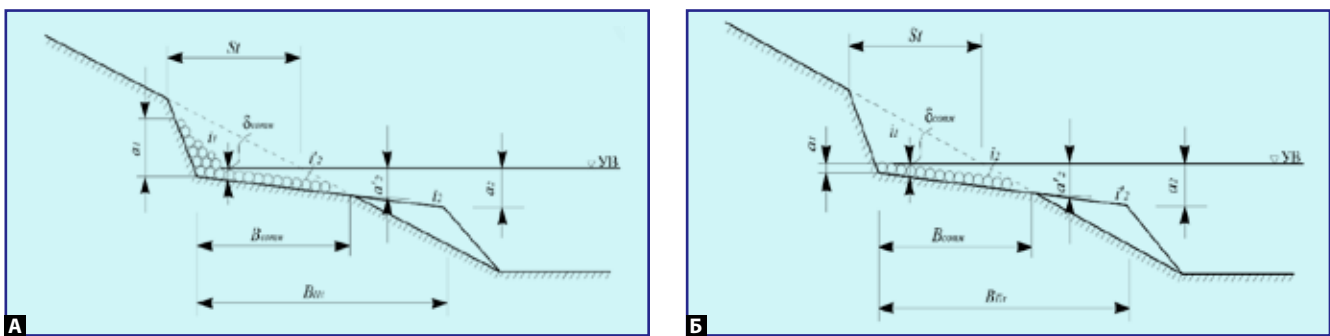


Рис. 7. Варианты профиля равновесия в зависимости от содержания крупнофракционного материала в грунте [12]
 А – профиль с призмой $25\% < P_{гр} < 50\%$; Б – профиль без призмы $10\% < P_{гр} < 25\%$

($B_{пл}$ – ширина подводной части отмели шириной $B_{отм}$ и толщиной слоя $-\delta_{отм}$ [3, 4, 9] (рис. 7; таблица).

Возможность создания искусственной самоотстки по аналогии с естественным процессом позволила разработать принципиально новую инновационную методику защиты разрушаемого берега, сложенного несвязными грунтами с повышенной неоднородностью [3, 4]. Наибольший эффект при размыве в виде укрепления берега самоотсткой дает песчано-гравийная смесь с содержанием крупных частиц примерно 25% из расчета на 1 м^3 грунта. Ее оптимальный, установленный опытным путем состав, при котором наблюдается существенное замедление (в результате образования отмстки), а затем и прекращение размыва, определяется наличием

фракций следующих диаметров: для условий водоемов, где возможна высота волны до 1 м (например, Заславское водохранилище), – $d_1 = 3,5 \text{ см}$, $d_2 = 7,5 \text{ см}$, $d_3 = 13,5 \text{ см}$, $d_4 = 17,5 \text{ см}$; для водоемов, где высота волны достигает 0,4 м, – $d_1 = 1,7 \text{ см}$,

$d_2 = 3,5 \text{ см}$, $d_3 = 6,5 \text{ см}$, $d_4 = 8,5 \text{ см}$.

Результаты экспериментальных исследований с использованием песчано-гравийной смеси оптимального состава, разрушение которой обеспечивает образование самоотстки и прекращение раз-

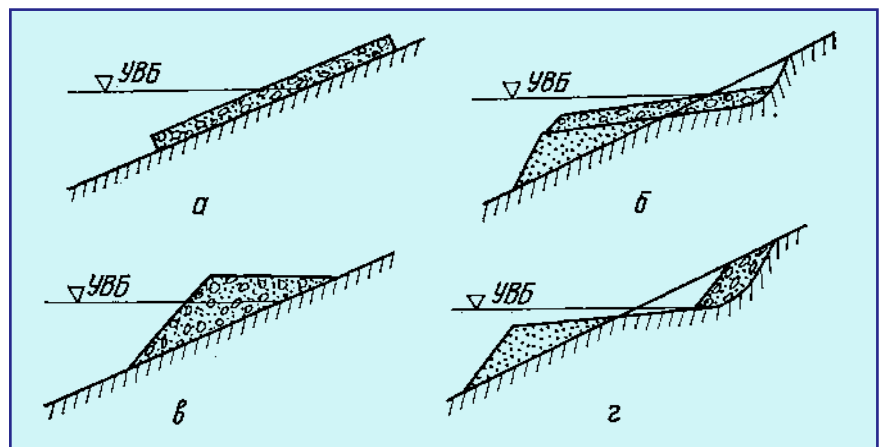


Рис. 8. Варианты укладки смеси оптимального состава при защите разрушаемого берега

рушения берега, позволили решить технологическую задачу по стабилизации, торможению процесса переработки берегоукрепления. Были рассмотрены различные варианты укладки на откос (рис. 8):

- нанесение смеси на поверхность исходного профиля до заполнения водохранилища (рис. 8а);
- укладка смеси на сформировавшуюся в первые 3–5 лет береговую отмель (рис. 8б);
- отсыпка смеси в виде бермы до заполнения водохранилища (рис. 8в) и спустя 5 лет после его эксплуатации (рис. 8г).

Серия лабораторных экспериментов по оценке действенности вариантов укладки песчано-гравийной смеси и берегозащитному эффекту позволила установить, что лучший результат обеспечивает укладка в безледный период для водоемов с величиной сработки уровня верхнего бьефа более 0,5 м (рис. 8б) либо менее (рис. 8г).

Метод нового способа берегозащиты заключается в следующем [3, 4]. В прибрежной зоне водоема, которая может подвергаться переработке перед заполнением или же в первые 2–3 года его эксплуатации, средствами механизации (экскаватором) вдоль уреза воды выполняется вертикальная врезка трапецидального либо прямоугольного сечения (рис. 9). После

Тип профиля с самоотмосткой	Элемент профиля	Расчетная зависимость*
Самоотмостка с призмой на урезе при $25\% \leq P_{rp} \leq 50\%$	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = (1,5 - 2,0) \partial_{отм}$
	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	$i_1 = 0,032 \left(\frac{h_{1\%} \sqrt{\lambda_0}}{D_{50} \eta_0^{0,3}} \right)^{\frac{2}{3}} + i_0$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i_2 = 0,028 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,50 i_2'$
Профиль с самоотмосткой без призмы при $10\% \leq P_{rp} \leq 25\%$	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = \partial_{отм}$
	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	$i_2 = 0,012 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,60 i_2'$

*Примечание к рис. 7 и таблице: a_1, a_2, a_2' – пределы размыва, глубина в конце самоотмостки, м; $h_{1\%}$ – высота волны, м; λ_0 – длина волны, м; d_{50}, D_{50} – средневзвешенная крупность частиц размываемого грунта и частиц самоотмостки соответственно, м; η_0 – коэффициент неоднородности размываемого грунта; i_0, i_1, i_2, i_2' – уклоны исходного профиля и поверхности элементов самоотмостки соответственно; УВБ – уровень верхнего бьефа водохранилища.

Таблица. Зависимости для расчета элементов профиля с креплением самоотмосткой

изъятия грунта из выемки ее объемом заполняется в несколько слоев крупнофракционным материалом: нижняя часть – камнем, середина – гравийной смесью, верхняя – естественным грунтом с повышенной неоднородностью (коэффициент неоднородности, $\eta_0 \geq 5$). Желатель-

но, чтобы врезка заполнялась песчано-гравийной смесью оптимального состава.

Расстояние от уреза до оси врезки определяется по результатам прогнозных расчетов линейной переработки (S_0, S_6), которые выполняются по методикам [4]. Глубина врезки (H_6) принимается равной отметке уровня мертвого объема водоема (УВ) (рис. 9).

Применение и учет в практике проектирования берегозащитных мероприятий эффекта самоотмостки позволит сэкономить дорогостоящие стройматериалы, а также при минимальных издержках провести действенную берегозащиту. Результативность использования явле-

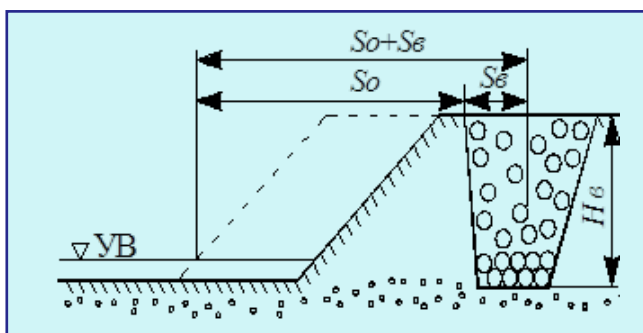


Рис. 9. Защита размываемых берегов путем создания искусственной самоотмостки



Рис. 10. Искусственная самоотмстка на Заславском водохранилище

ния самоукрепления откоса подтверждается сравнением затрат на укладку 1 м^3 гравия на закрепляемый откос и 1 м^3 песчано-гравийной смеси повышенной неоднородности. Для расчета укладки гравия предлагается формула

$$C = T_p + П + C_r$$

где T_p , $П$, C_r – транспортные и погрузочные расходы, а также стоимость гравия. Укладка же песчано-гравийной смеси требует следующих затрат:

$$C = T_p + П.$$

Предлагаемая инновационная технология предотвращения развития разрушений берегов водохранилищ, отличающаяся высокой эффективностью при относительной дешевизне, основана на использовании естественного эффекта самоотмстки, которая производит надежное крепление откоса и препятствует его дальнейшему размыту (рис. 10).

При выделении величины годовых расходов на эксплуатацию берегозащитных сооружений в отдельную статью затрат, не входящую в расходы всего гидроузла,

сравнение экономической эффективности рассматриваемых вариантов защиты выполняется путем сопоставления суммы капитальных вложений и эксплуатационных расходов, то есть

$$П_i = (M_i + k_i E_n) L_{абр.}$$

где $П_i$ – приведенные затраты по каждому варианту, тыс. руб/год; M_i – годовые эксплуатационные расходы (по вариантам), тыс. руб/год; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,1–0,18), 1/год; k_i – капитальные вложения по вариантам, тыс. руб.; $L_{абр.}$ – протяженность участка берегозащиты, м.

Как показали расчеты, приведенная технология, в основе которой лежит эффект самоотмстки, примерно в 10 раз экономичнее, чем отсыпка из дорогостоящего гравия или камня. В отличие от традиционных типов креплений откосов, которые не всегда препятствуют деформациям и требуют от службы эксплуатации постоянной подсыпки и ремонта покрытия в местах локальных размывов, применение данного метода позволяет надежно закреплять и стабилизировать берег

в течение 1–2 сезонов [5, 6]. 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 закрепляемого откоса (ориентировочная денежная оценка – на период осени 2017 г.). Данный способ был впервые использован в Беларуси на Заславском водохранилище (рис. 10).

Таким образом, применение в практике строительства берегоукрепительных сооружений, использующих естественные грунты, которые имеют включения гравия, гальки, валунов, позволит сэкономить на дорогостоящих строительных материалах, упростить проведение защиты, полностью исключить издержки на эксплуатацию. Способ берегоукрепления с помощью грунтов с повышенной неоднородностью рекомендован для районов Поозерья и центральной части нашей страны. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимчук В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев, 1981.
2. Пышкин Б. А. Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин // Киев, 1973.
3. Левкевич В. Е. Опыт эксплуатации берегозащитных сооружений в Белоруссии / В. Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. – 1991. № 5. С. 66–74.
4. Левкевич В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск, 2015.
5. Левкевич В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Минск, 2017.
6. 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.
7. 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.
8. Отраслевая программа развития электроэнергетики на 2016–2020 годы. Постановление Министерства энергетики Республики Беларусь от 31.03.2016 № 8.
9. 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.