

В. Е. Левкевич

КРЕПЛЕНИЕ БЕРЕГОВ И ВЕРХОВЫХ
ОТКОСОВ ПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ГИДРОУЗЛОВ БЕЛАРУСИ

Минск
БНТУ
2019

УДК 627.81:556.557

ББК 26.35

Л37

Левкевич, В. Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : БНТУ, 2019.–172 с.– ISBN 978-985-583-473-2.

В монографии приведена классификация берегозащитных и берегоукрепительных сооружений и анализ креплений, получивших распространение в мировой и отечественной практике. В книге представлены результаты исследований берегоукрепительных сооружений, эксплуатируемых в Беларуси, а также причины развития деформаций креплений грунтовых откосов подпорных сооружений и берегов водохранилищ. Приведены современные технологии крепления и берегозащиты, анализируется экономическая эффективность их применения. Книга рассчитана на специалистов в области гидротехнического строительства, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших технических учебных заведений.

Рекомендовано к изданию решением научно-технического совета
Белорусского национального технического университета
(протокол № 1 от 27.09.2019 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *И. В. Качанов*,
(Белорусский национальный технический университет)
доктор технических наук, профессор *В. Н. Кондратьев*,
(РУП Институт мелиорации НАН Беларуси);
доктор технических наук, зав. отделом *Б. В. Курзо*,
(ИПИПРЭ НАН Беларуси),
доктор экономических наук, профессор *А. И. Лученок*,
(Институт экономики НАН Беларуси)

ISBN 978-985-583-473-2

© В. Е. Левкевич, 2019

© Белорусский национальный
технический университет, 2019

*"Не то, что мните вы, природа:
Не слепок, не бездушный лик –
В ней есть душа, в ней есть свобода,
В ней есть любовь, в ней есть язык..."*

Ф. И. Тютчев

ВВЕДЕНИЕ

Создание современных техногенных объектов, каковыми являются водохранилища, независимо от их линейных размеров, вызывает активное формирование береговой зоны, протекающее под воздействием различных гидродинамических факторов: ветрового волнения, колебания уровней, течений, ледовых явлений. В зоне активного берегоформирования оказываются водозаборы, гидротехнические сооружения, жилые постройки, дороги, линии электропередач. В этой связи, возникает необходимость проведения комплекса берегозащитных и берегоукрепительных работ.

В книге приведена классификация существующих и используемых в мировой практике берегозащитных сооружений и креплений, а также рассмотрены основные типы берегозащиты и крепления берегов наиболее часто применяемых в Беларуси. В настоящей монографии представлены результаты многолетних натурных исследований берегозащитных и берегоукрепительных сооружений водохранилищ Беларуси и материалы исследований устойчивости креплений берегов и откосов, выполненных автором. По данным фактических и проектных материалов определена эффективность защиты разрушаемых откосов подпорных сооружений и деформируемых естественных берегов, а также показаны современные инженерные решения в области берегоукрепления. Основой для написания монографии послужили материалы собственных исследований автора с привлечением опубликованных данных и методик д.т.н., профессора Э.И. Михневича, архивных материалов к.т.н., доцента Е. М. Левкевича, а также экспедиционных и лабораторных материалов исследований к.т.н., доцентов: Г. И. Касперова, С. М. Пастухова, и В. В. Кобяка и магистрантов: А. В. Бузука и Д. С. Микановича.

Настоящая монография подготовлена в рамках научных исследований кафедры «Водоснабжение и водоотведение» по программе ГПНИ: «Информатика, космические исследования и научное обеспечение безопасности человека, общества и государства» (ГПНИ «Информатика, космос и безопасность») на 2016 – 2020 гг.

Глава 1

МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ И БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Появление первых берегозащитных сооружений относится к античному периоду истории, что подтверждается остатками древних береговых строений в Александрийском порту, портах Аппенинского и Пелопонесского полуостровов. В Англии, на берегах Девоншира найдены подпорные стенки и дамбы, построенные в III–IV вв. до н.э.

Изобретение в 1844 году цемента и чуть позже появление железобетона вызвало технологический бум в области берегоукрепления. С тех пор различные типы железобетонных конструкций стали быстро внедряться не только в портовом строительстве, но и в берегоукреплении. Вначале, это были подпорные и волноотбойные стены, затем подводные волноломы, буны и траверсы, волногасящие наброски фигурных массивов и др. Но с появлением железобетона проблема эффективной защиты берегов решена не была. Как не парадоксально, но в худшем положении оказались те участки побережья водных объектов, где проводилось активное строительство железобетонных берегоукрепительных сооружений. Причина этого состоит в том, что внедрение жестких конструкций в береговую зону приводит к существенной перестройке всей системы взаимосвязей и взаимозависимостей гидро- и литодинамических процессов [1–8].

Тотальное внедрение железобетона не единственный неудачный опыт берегоукрепления. Поэтому при выборе методов защиты берегов важно учесть ошибки, а так же принять во внимание положительные результаты, которые были достигнуты решении проблемы эффективной берегозащиты.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что эффективность берегозащитных мероприятий зависит в значительной степени от соблюдения нескольких концептуальных принципов. Один из ключевых состоит в следующем – а нужна

ли защита? Для ответа на этот вопрос, необходимо знать: в каком состоянии находится берег, нарушено ли его динамическое равновесие и каковы причины нарушения этого равновесия. Ведь любая неудачная попытка укрепить берег может вызвать нежелательные последствия, в частности, трансформацию берега в систему с еще худшими относительно начального состояния свойствами [4]. Если решение о строительстве берегозащитного сооружения принято, необходимо выбрать эффективный, обеспечивающий поддержание береговой зоны в динамически устойчивом состоянии метод берегозащиты. Рациональное решение этой проблемы требует комплексного подхода к берегам как сложной природной системе. С точки зрения развития процесса абразии в Европе самые уязвимые – это берега северной части европейского континента: меловые склоны Нормандии и Бургундии, Германии, Польши, Калининградской области, Литвы и Латвии, а также Ленинградской области России. Начиная с 50-х годов разрушения берегов увеличились, причем как на клифовых, так и на дюнных берегах. На Куршской косе в результате разрушительного шторма в январе 2012 года, волнами было повреждено покрытие променада в г. Светлогорске, а пляжи разрушены (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Променад в г. Светлогорске. Калининградская область России

Аналогичная сложная по пестроте картина берегоформирования наблюдается на побережье северной части Черного и восточной части Азовского моря в пределах Украины и России. Особенно ярко процесс формирования динамически активных берегов происходит в Одесской области на побережье Крымского и Таманского полуостровов, Черноморском побережье Кавказа России. Активные процессы формирования побережья имеют место на Каспийском море в районе г. Каспийска и всего западного побережья.

Берегоукрепительные и берегозащитные сооружения относятся к гидротехническим сооружениям, предназначенным для защиты прибрежной береговой зоны от агрессивного воздействия ветрового волнения, течений и ледовых явлений. Возводятся они для предупреждения разрушений и затоплений берегов рек, морей, озёр и водохранилищ, откосов земляных дамб и искусственно созданных территорий – польдеров.

По *характеру взаимодействия с водным потоком* различают берегоукрепительные сооружения, так называемого **активного** и **пассивного** типа. Берегоукрепительные сооружения **активного типа** не только гасят энергию волн на подходе к урезу и береговому склону либо откосу, но и способствуют накоплению наносов, сохранению и созданию пляжей. Берегоукрепительные же сооружения **пассивного типа** только противостоят водному потоку, гася его энергию.

К берегоукрепительным *сооружениям активного типа* на морях и водохранилищах относятся буны, продольные подводные волноломы и сооружения прерывистого типа, состоящие из отдельных искусственных островков, расположенных с разрывами вдоль береговой линии, а также свободные пляжи. Берегоукрепительные сооружения активного типа, способны удерживать и накапливать наносы за счет изменения гидравлической структуры потока и относятся к так называемым наносоудерживающим. К ним относятся: волноломы с траверсами и без них, берегоукрепительные шпоры, буны, молы, а также искусственные пляжи, уположенные верховые откосы подпорных и ограж-

дающих сооружений (дамб) и некоторые другие, в частности, биологическая защита [9].

Сооружения активной берегозащиты

При активном методе защиты возводятся сооружения, которые в значительной степени гасят энергию волн на подходе к берегу, и способствуют накоплению наносов у берега и расширению пляжа [4–8]. В данном случае применяют сооружения в виде затопленных или незатопленных волноломов, расположенных нормально к береговой линии конструкций, называемых бунами. При этом все берегоукрепительные сооружения по ***расположению относительно уреза воды*** можно подразделить на поперечные и продольные (волноломы).

Волноломы

Волнолом (волнорез) – гидротехническое сооружение предназначенное для защиты береговой линии или акватории порта от цунами, течений, льда и наносов. От мола (волнореза соединенного с берегом и расположенного по нормали к урезу) отличается тем, что не примыкает к берегу.

Гребень незатопленного берегозащитных волнолома может значительно возвышаться над уровнем воды. Для уменьшения волнового воздействия на сооружение, исключения образования отраженных волн с их опасными размывающим действием, накопления наносов в за волновом пространстве сооружения подобный конструкции строят с затопленным гребнем и обычно называют подводными волноломами (рис. 1.2).

На них происходит гашение волн до 50%, остальное количество волновой энергии гасится естественным или искусственно отсыпанным пляжем. Для предотвращения образования между волноломом и берегом вдольбереговых течений, вызывающих перемещения наносов, подводный волнолом соединяется с берегом траверсами, расстояния между которыми в среднем со-

ставляет 250–300 м. Волноломы строятся на расстоянии 20–80 м от уреза. На некоторых участках побережья могут возводиться берегоукрепления комбинированного типа, состоящие из волнолома и берегозащитной стенки. Конструктивно они представляют собой обычные затопленные стенки вертикального или наклонного профиля.

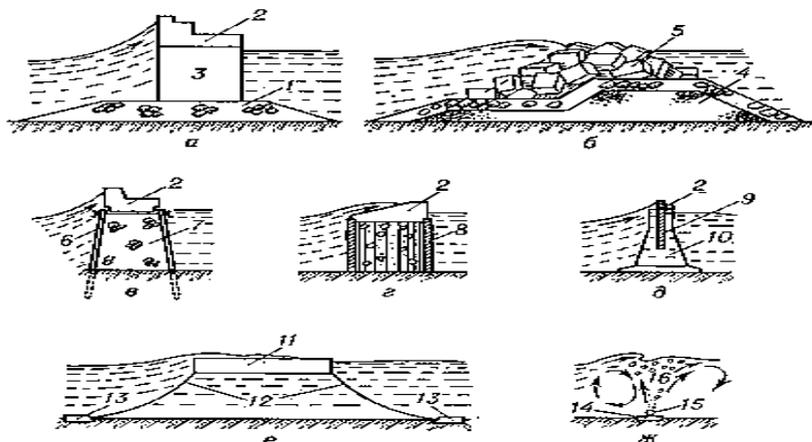


Рис. 1.2. Поперечные схемы затопленных волноломов различной конструкции

Волноломы могут быть также закрепленными и подвижными, проницаемыми и непроницаемыми (рис. 1.3).

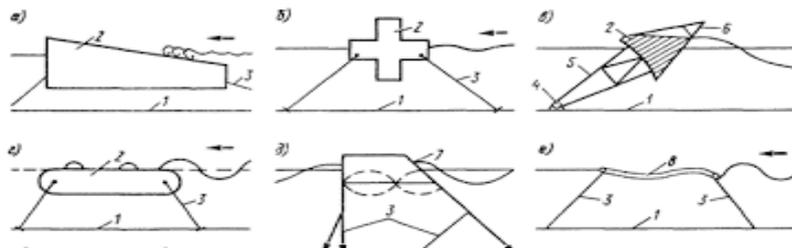


Рис. 1.3. Поперечные схемы плавучих и подвижных волноломов

Иногда переднюю грань волнолома выполняют из рваного камня неправильной формы. Это способствует возникновению при обрушении волн турбулентных течений в воде. Такая макропористая конструкция рассеивает давление при ударе гребня. Волноломы гравитационного типа подразделяются на откосные в виде вертикальной стенки и смешанные (рис. 1.4).

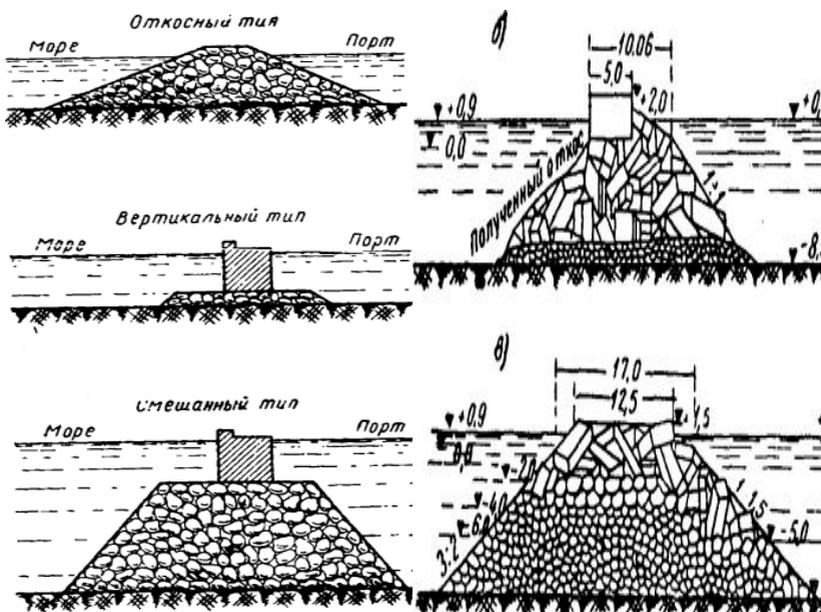


Рис. 1.4. Поперечные схемы гравитационных волноломов

Последние могут быть возведены из двух видов блоков – параллелепипедов. Существуют десятки схем компоновок, каждая из которых отличается формой кладки блоков и установки в береговой зоне (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Схема установки подводного волнолома

На основе проведенных исследований и опыта эксплуатации сооружений [6–8] были сделаны определенные выводы, которые учитываются при конструировании и строительстве подводных волноломов:

- при приближении волнолома к берегу улучшается наносоудерживающий эффект сооружения, но при этом степень гашения волн ухудшается.

- интенсивность аккумуляции наносов зависит от многих факторов, в частности от глубины перед волноломом и от отметки гребня волнолома.

- уменьшение крутизны лицевой грани способствует разрушению волны на волноломе без образования отраженных волн, которые препятствуют движению наносов к берегу и создают опасность размыва дна перед сооружением.

- положение и форма лицевой грани способствует аккумуляции наносов и расширению пляжа.

Поиск более совершенных берегозащитных конструкций привел к появлению подводных волноломов [4–8, 10–13]. Первый такой волнолом был построен по инициативе инженера Е. Е. Катрана в 1933 году для защиты берега в бухте Ланжерон в районе Одессы. Важным качеством волноломов является возможность накопления под их защитой аккумулятивных образований в виде вытянутых в сторону волнолома отложений пляжеобразующего материала – так называемых тамболо. Это по-

зволяет с помощью волноломов формировать бухтовые защитные пляжи (рис. 1.6–1.7).



Рис. 1.6. Создание и защита пляжей, образованных с помощью волноломов



Рис. 1.7. Бухтовые пляжами прерывистые волноломы (Дубай, ОАЭ)

В США и ряде стран Европы используется сочетание как активной берегозащиты так и намывных песчаных пляжей. Многие страны прошли этап строительства только жестких берегозащитных сооружений, тем более, что практика показала – такие сооружения дороги, неэффективны и их использование снижает рекреационную ценность побережья.

Молы

Мол – гидротехническое оградительное сооружение для защиты акватории порта от волнения, примыкающее одним концом к берегу (рис. 1.8; 1.9).



Рис. 1.8. Италия. г. Неаполь. Каменнабросной мол (фото Левкевича В. Е.)

Одновременно, мол может служить для размещения причалов и перегрузочных устройств. Различают следующие типы молов:

- откосного типа, сооружаемые путем наброски из камня или бетонных массивов, так называемого гравитационного типа (рис. 1.9);
- вертикального типа в виде стенок, возводимые из каменной кладки, бетонных или железобетонных массивов (рис. 1.10);
- комбинированного типа (сочетание первых двух типов) (рис. 1.11).



Рис. 1.9. Греция. Остров Крит. Каменный мол (фото Левкевича В. Е.)

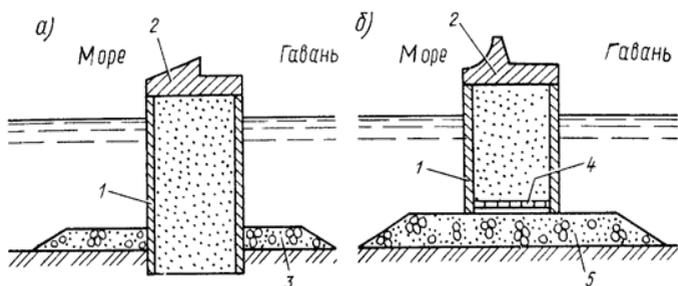


Рис. 1.10. Поперечные схемы гравитационных молов:

1 – бетонная стенка; 2 – волноотбойный элемент; 3 – подушка из горной массы; 4 – ребро жесткости; 5 – основание

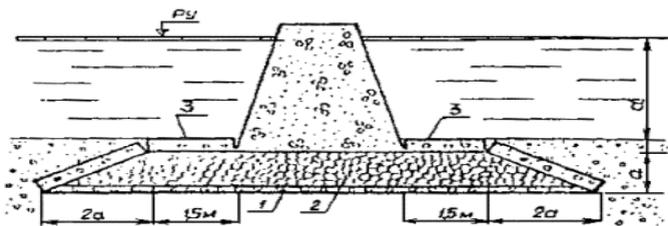


Рис. 1.11. Мол комбинированного типа:

1 – основание; 2 – подсыпка из горной массы; 3 – плитное крепление

Головная (выдвинутая в акваторию) часть мола обычно делается на 1–1,5 м выше остальной, и на ней устанавливают сигнальный огонь или маяк (рис. 1.12). Например, мол Банный расположен на небольшом полуострове Далёкий, недалеко от д. Пятиречье Приозерского района Ленинградской области. Мол выложен гранитными валунами и имеет длину 550 м.



Рис. 1.12. Мол «Банный». Ленинградская область России

В портах, расположенных на открытом берегу, часто сооружают два сходящихся или параллельных мола с воротами между ними (парные мола). Если порт расположен в бухте, берега которой частично защищают акваторию от ветра и волн, обычно устраивается один или два мола (рис. 1.13).



Порт «Крым» Керченский пролив

Дания, мол meersbuhne

Рис. 1.13. Мола различных портов

Буны

Буна – регулирующее сооружение (полузаграда, поперечная дамба, выдвинутая от берега в сторону моря или реки) и служащее для предохранения берега или гидротехнического сооружения от размыва. Буны представляют собой поперечные наносоудерживающие сооружения, препятствующие движению наносов вдоль берега и способствующие накоплению наносов и образованию пляжа [4–8]. При наличии вдольберегового потока наносов, наносы заполняют входящий угол, обращенный навстречу движению. Длительность процессов намыва и размыва зависят от многих факторов, в частности, от длины шпору, количества и крупности наносов, степени волнения и могут колебаться от двух до десятикратной длины буны и шпору. Обычно буны строятся группами (рис. 1.14). Одиночная буна называется шпурой. При этом заполнение пазух происходит последовательно. Наибольшая ширина пляжа возникает у грани бун, обращенных в ту сторону, откуда движутся наносы.



Рис. 1.14. Схема расположения бун и перехвата вдольберегового потока наносов

В зонах так называемой волновой тени, затененных от волнения участках побережья ширина пляжа на межбунных промежутках «минимальная». Таким образом, контуры берега становятся пилообразными (рис. 1.15). Накопление наносов в межбунных промежутках происходит только при наличии полого берегового откоса. Направление бун обычно берется по нормали к береговой линии. Иногда голова буны может отклоняться от перпендикулярного направления в ту сторону, куда движутся наносы.



Рис. 1.15. Буны гравитационного типа

На практике чаще всего применяются буны гравитационного типа из обычных массивов, реже устраиваются -буны свайных конструкций [10–15].

Буны – поперечные (нормально расположенные к береговой линии) сооружения для удержания пляжеобразующего материала из естественного вдольберегового потока наносов и сохранения естественного или искусственного пляжа в межбунных отсеках. Буны делятся на два основных вида – линейные и мысовидные.

Линейные буны могут быть однорядные и двухрядные, свайные – из сборного железобетона, на колоннах – оболоч-

ках и из призматических блоков, а также из деревянных свай (рис. 1.16).

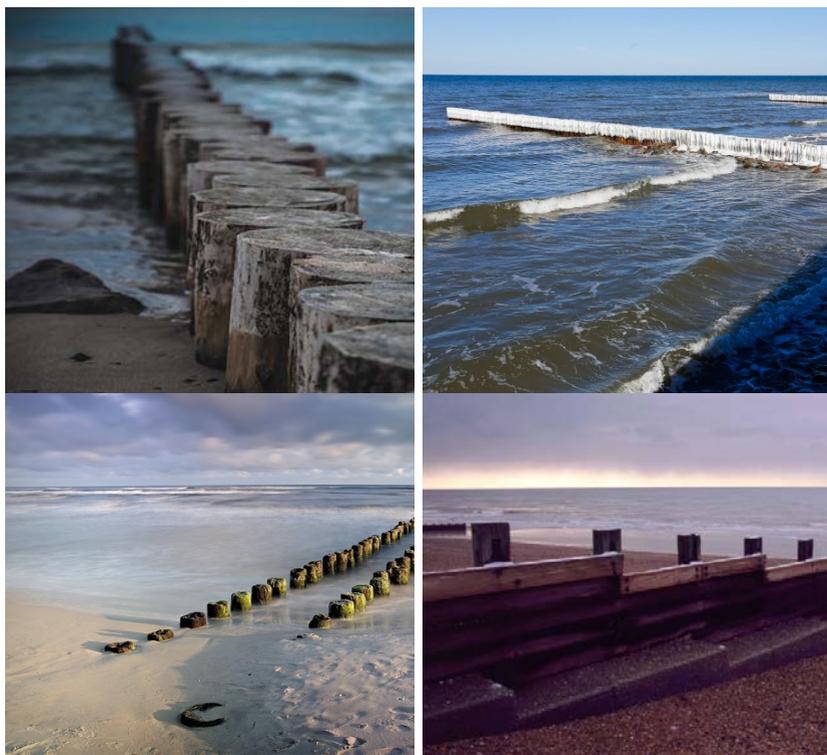


Рис. 1.16. Буны свайного типа

Мысовидные буны отличаются от линейных тем, что образуют искусственную территорию, которая может быть использована в рекреационных или технических целях. Как отмечалось ранее, основное назначение бун – перехват вдоль-берегового потока наносов, их накопление или удержание в межбунных отсеках – накопителях.

Буна – это активное берегозащитное сооружение, которое с одной стороны (наветренной) задерживает пляжеобра-

зующие наносы, перемещаемые вдоль берега, а с другой (подветренной) вызывают низовой размыв. Тем самым нарушается природное равновесие. К тому же, из-за размыва подветренных участков приходится «растягивать» участок берегозащиты по фронту, что приводит к снижению устойчивости окружающих ландшафтов (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Франция. Защита участка берега бунной «гребенкой»

Буны нарушают естественные ландшафты морского побережья и с современных эстетических позиций их применение нежелательно. Наличие бун уже само по себе вносит существенное изменение в динамику береговой зоны. Прежде всего, они нарушают продольную структуру перемещения пляжевых и песчаных наносов, и поэтому подветренный берег почти всегда будет испытывать дефицит материала. Правильно сконструированные буны могут замедлить и даже полностью прекратить движение пляжных наносов вдоль берега. В результате этого в межбунных отсеках накапливается пляж, который защищает берег от воздействия волнения (рис. 1.18).

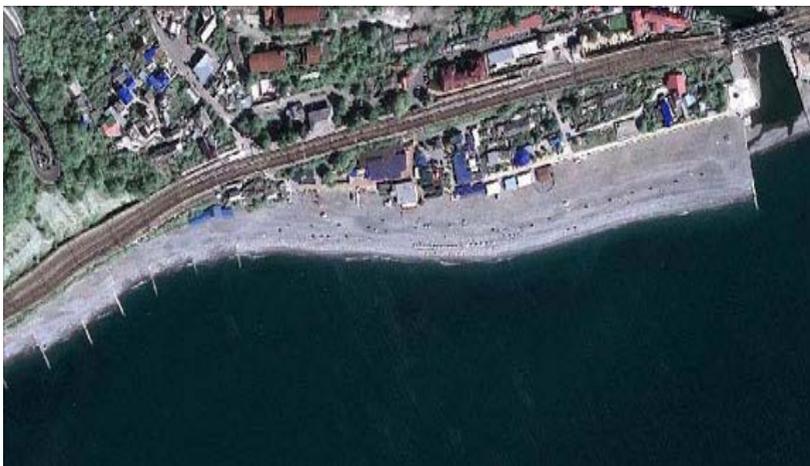


Рис. 1.18. Буны, задерживающие вдольбереговой поток наносов
(п. Дагомыс)

Свободные пляжи

Искусственно намытые песчаные пляжи, которые выполняют роль самостоятельных волногасящих сооружений без бун или подводных волноломов с траверсами, получили название *свободных пляжей*. Это средство берегозащиты приобрело распространение в США, Нидерландах, а также ряде стран южной Европы – Италии, Греции, Испании и др.. Свободные пляжи под влиянием волнения и вдольбереговых течений, возникающих при штормах и нагонах, непременно теряют часть наносов в виде песка и уменьшаются в объеме, что ограничивает их применение. Аналогичное решение принято при разработке проекта реконструкции и берегоукрепления берегов Балтийского моря в Финском заливе в районе г. Зеленогорска (рис. 1.19).



Рис. 1.19. Россия. Балтийское море. г. Зеленогорск. Проектное решение берегозащиты участка п. Комарово-Репино бунной гребенкой с траверсами

Существуют определенные ограничения применения свободных пляжей в практике берегозащиты, которые необходимо учитывать при их строительстве [4–8,10–15]:

- при берегозащите с использованием свободных пляжей не нарушается природный водообмен в береговой полосе. К тому же свободные пляжи эстетичнее, в отличие от наносоудерживающих сооружений;

- свободные пляжи в условиях водохранилищ можно создавать при осенне-зимней сработке уровней верхнего бьефа как насыпным способом при наличии мощных подводных карьеров песка, так и с использованием средств гидромеханизации путем гидронамыва. Для создания и периодического обновления пляжа целесообразно применение системы «бай-пасинг», представляющей собой перекачку наносов с одной стороны сооружения, где они задерживаются на противоположно стороне [3]. Пример применения такой технологии реализован на Новосибирском водохранилище в 80-е годы XX века.

Различают пляжи аккумулятивных и абразивных берегов. Пляжи образуются в полосе морского берега или берега водохранилища, имеющего малый уклон к водоему. Такие пляжи могут быть представлены в естественных условиях валунами, галькой, гравием или песками, и откладываться за счет волноприбойной деятельности. Пляжи представляют собой геодинамическую систему, которая может изменять свои характеристики под влиянием штормовых воздействий и других факторов. Помимо линейной схемы берегозащиты и формирования пляжей и искусственных территорий существуют технические решения, отработанные на гидравлических моделях и нашедшие широкое применение за рубежом — и в бывшем СССР на водохранилищах Днепровского каскада [3, 6–8] – бухтовые аккумулятивные формы, которые являются аналогами природных. Существуют два вида бухт:

а) закрытые бухты, у которых внутренняя акватория соединена с морем узким проливом, что обеспечивает максимальную защиту берега внутренней акватории от волнового воздействия.

б) открытые бухты, акватория которых не отделена от моря, а ограничивающие бухту мысы выполняют двойную функцию — исключают возможность уноса пляжеобразующего материала и вызывают трансформацию подходящей волны, изменяя угол ее подхода к пляжу, обеспечивая саморегулирование и динамическую устойчивость пляжа по всему периметру бухты (рис. 1.20).

Такой метод защиты берега отвечает принципу максимального соответствия гидротехнических сооружений существующим в природе элементам защиты от волнения [3, 6]. Различные способы «естественной» защиты морских берегов в последние десятилетия распространена достаточно широко. Прерывистое крепление морских берегов начало внедряться в Испании, Франции и Италии еще в середине 60-х годов.



Рис. 1.20. Франция. Марсель. Искусственный пляж, созданный методом строительства искусственных мысов из горной массы

Эффективность прерывистых волноломов определяется их способностью снижать энергию волн в заволноломном пространстве. В результате этого, между берегом и сооружением создаются волновая тень и происходит аккумуляция наносов. В одном случае образуется выступ или салиент, а в случае соединения аккумулятивной формы с берегом – перрейма или тамболо. Использование прерывистых волноломов позволяет добиться стабилизации пляжей на протяженных участках.

Аналогичные принципы защиты берега реализуется при отсыпке искусственных островов. Параллельно при этом решается задача создания новых отвоеванных у моря территорий.

Для того, чтобы оценить степень воздействия берегозащитных сооружений, мероприятий по укреплению побережья на окружающую среду, необходимо вначале понять характер действия рассматриваемых средств берегозащиты.

Создание искусственных бухтовых пляжей направлено на улучшение естественных условий. Берега со свободными пляжами являются не только надежным инженерным берего-

защитным сооружением, но и дополнительным рекреационным объектом (рис. 1.21).



Рис. 1.21. Формирование пляжа естественным потоком наносов с помощью приливистых волноломов, салиентов и томболо

На сегодняшний день по данным Small и Nicholls (2018) на земле проживает более 7,7 миллиардов человек, 38% из которых живут в прибрежной зоне в пределах 100 км береговой черты. Прогнозируется, что население на Земле к 2050 году значительно увеличится, причем с наибольшим увеличением в прибрежной зоне. Во Франции в результате урбанизации отмечается значительное изменение приморских ландшафтов, и ежегодно около 1% «свободных», неосвоенных территории становится урбанизированными.

Последние десятилетия XX-го и начало XI-го веков характеризуются интенсивным ростом туризма вдоль побережий водных объектов. По современным оценкам использование прибрежной зоны в качестве места отдыха стало самым крупным в мире экономическим фактором и основным источником дохода для развития инфраструктуры ряда приморских стран. Мировой опыт показывает, что развитие курортно-рекреационной сферы на побережьях невозможно без наличия пляжей. Однако, в последние десятилетия усилились процессы размыва естественных

коренных берегов, что привело к сокращению ширины пляжей и потере ценных рекреационных территорий. Так, из общей береговой линии Крымского полуострова (около 1000 км), пляжи составляют 517 км, в том числе свыше 100 км – искусственные. На восточном и западном побережье Крыма пляжи, в основном, естественные и тянутся сплошной полосой, а на Южном берегу Крыма (ЮБК), в основном, пляжи искусственные. Сейчас более половины искусственных пляжей находится в аварийном состоянии, так как их площади сократились на 30–50%. Общая протяженность морского побережья Крыма составляет 1175 км, из них 945 км – береговая полоса Черного моря, 230 км – Азовского моря. На Черноморском побережье Крыма укреплено порядка 80 км, вместе с тем большинство берегоукрепительных сооружений построены на ЮБК во времена СССР и были рассчитаны на 25 лет службы. В настоящее время 30% берегозащитных сооружений ЮБК находится в эксплуатации более 40 лет, а 70% – от 25 до 40 лет. Срок эксплуатации большинства из них формально истек, сооружения имеют значительный износ и повреждения. Искусственные песчаные пляжи, создаваемые на побережье (ЮБК) и намываемые без вспомогательных систем из бун или подводных волноломов с траверсами, в отечественной практике получили название «свободных пляжей». (рис. 1.22).



Рис. 1.22. Литва. г. Паланга. Свободный пляж (фото Левкевича В. Е.)

Исходя из опыта многих стран, а также отечественного, величины уклонов поверхности искусственных пляжей должны соответствовать естественным уклонам участка местного пляжа, а крупность материала должна быть большей или равной его крупности на естественном конкретном пляже. Например, неудачный опыт по намыву искусственных пляжей в Ирландии связан с использованием слишком мелкого материала, быстро вымытого в море. Наилучшими условиями для образования «свободных пляжей» признаны заливы и глубоко врезанные бухты (защищенные от волнений участки побережий). Поэтому, сооружение искусственных намывных пляжей в рекреационных целях получило большой размах во многих странах, таких как США, Португалия, Кувейт, Гонконг, Франция, ФРГ, Бельгия, Испания, Уругвай, Мексика.

Сооружения пассивной берегозащиты

Пассивные берегоукрепительные сооружения в зависимости от основного материала, из которого возводятся, могут быть представлены волноотбойными стенками, набережными, наброской из крупных блоков; каменной наброской и мощением, креплением железобетонными и бетонными плитами, металлическим шпунтом, асфальтобетонным покрытием, деревянным креплением, а также креплением из искусственных материалов и комбинированной защитой.

По конструкции сооружения пассивной берегозащиты делятся на сооружения откосные, вертикальные и комбинированные. Наиболее распространены откосные сооружения – плитные, тюфячные и набросные.

Плитные крепления с крутизной откоса (уклоном) 1:1,5–1:3 устраивают из сборных или монолитных железобетонных плит толщиной 15–40 см, укладываемых на фильтрующий слой из щебня или синтетического материала.

На более пологий откос (крутизной 1:2,5–1:5) укладывают тюфячные покрытия. Изначально они представляли со-

бой хворостяные выстилки, пригруженные камнем. С середины XX века распространение получили тьюфячные покрытия в виде гибких асфальтобетонных матов или сборных железобетонных плит небольшого размера, шарнирно связанных друг с другом.

Набросные берегоукрепительные сооружения из камня или фигурных бетонных блоков различного размера и формы могут возводиться при крутизне откоса 1:1,25–1:1,5 (рис. 1.23).



Рис. 1.23. Дополнительная пассивная берегозащита тетраподами

Набросные сооружения из фигурных бетонных блоков

Анализ опыта берегозащиты показал [2, 4–6], что не все реализованные методы берегоукрепления являются достаточно эффективными. Особенно это касается жестких систем берегоукрепления – железобетонных волноотбойных стен и бун. Эти сооружения обеспечивают надежную защиту берега в морских условиях лишь на непродолжительный срок (10 лет против 25-ти лет эксплуатации). Продление их срока эксплуатации требует дополнительных берегоукрепительных мероприятий. Традиционно – это строительство перед стеной бермы из **тетраподов**, различного рода набросок железобетонных массивов и др., которые ограничива-

ют возможность использования побережья для отдыха (рис. 1.23). Получили широкое распространение в странах Западной Европы (Германии, Франции), а также России и Украины.

Тетраподы представляют собой фигурные бетонные блоки для берегозащитных и оградительных сооружений, изготавливаемые промышленным способом (рис. 1.24).

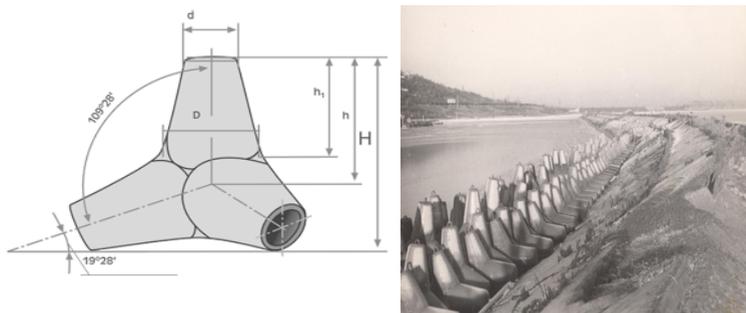


Рис. 1.24. Конструктивные особенности тетрапода

Основные характеристики тетраподов приведены ниже в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики тетраподов, используемых в России

h, расстояние от основания конуса до центра тетрапода, мм	B, ширина, мм	H, высота, мм	Масса, т
T – 1,5	880	1440	1340
T – 3	1120	1830	1700
T – 5	1380	2250	2070
T – 7,8	1560	2550	2350
T – 13	1800	2940	2790
T – 20	2020	3300	3100
T – 25	2180	3560	3350

Наряду с **тетраподами** – фигурными бетонными блоками, предназначенными для берегозащитных и оградительных сооружений, применяются **гексабиты** – фигурные блоки, предназначенные для устройства откосных и сквозных оградительных сооружений акватории и причалов. Для проведения дополнительной берегозащиты и усиления берегозащитного эффекта в ряде случаев выполняются работы по дополнительному укреплению откосов, молов и волноломов фигурными бетонными элементами (рис. 1.25).



Рис. 1.25. Пассивная берегозащита фигурными блоками

Такой тип крепления широко применяется на тихоокеанском побережье России, Японии и Китая, а также странами балтийского бассейна: Данией, Швецией, Норвегией, Германией, Польшей.

Габионное крепление

Достаточно редко для защиты откосов используют ящики и клетки из различных материалов, а также мешки из проволочной сетки, называемые габионами, которые заполняют камнем. Габионы имеют размеры: длина: 1,5–2 м, ширина – 1/3 длины и высота 1/8–1/10 длины. Укладываются на откос габионы длинной стороной параллельно урезу. Достоинство

габионной кладки состоит в том, что, обладая гибкостью, такой вид берегоукрепления не разрушается при неравномерных осадках грунта, хорошо удерживает грунт от вымывания и свободно пропускает воду (рис. 1.26).

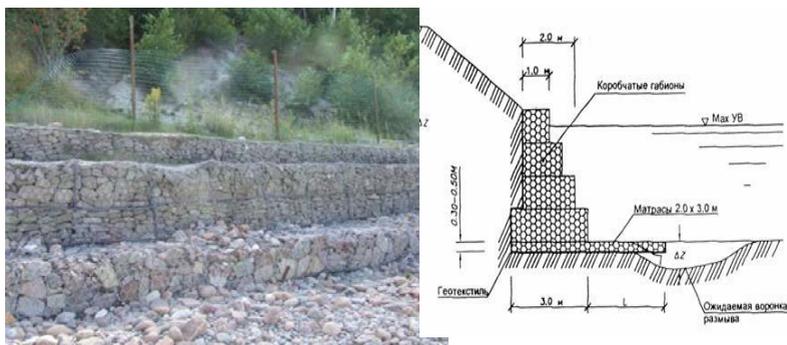


Рис. 1.26. Берегозащита габионами. г. Светлогорск. (фото Левкевича В. Е.)

Каменная наброска

Одним из наиболее распространенных способов крепления береговых откосов в морских условиях является каменная наброска. Обычно для этих целей применяется рваный камень средних размеров (от 15 до 70 см), так как применение мелкого камня не обеспечивает устойчивости откоса, а камни крупных размеров образуют большие щели, нарушающие целостность откоса.

Крепление каменной наброской (рис. 1.27; 1.28) состоит из обратного фильтра или дренирующего слоя из песка, щебня и гравия, на котором располагается слой камня. Каменная наброска обычно опирается на упорную призму, назначение которой состоит в предотвращении оползания камней и вымывания грунта.

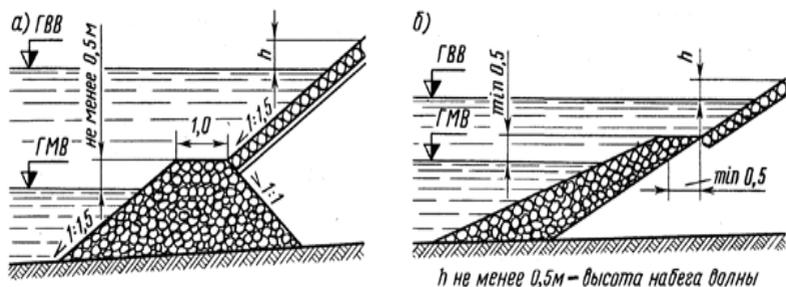


Рис. 1.27. Варианты берегоукрепления из каменной наброски

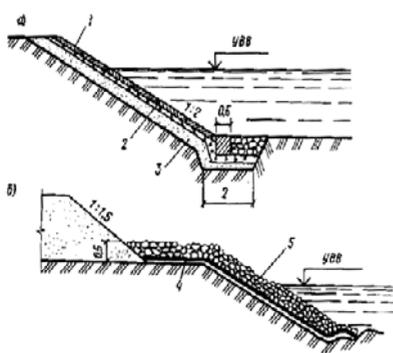


Рис. 1.28. Пассивная берегозащита габионами и каменной наброской.
г. Светлогорск. Калининградская область России

Обычно крепление каменной наброской применяется при следующих условиях: высота подводного откоса от 2 до 8 м; расчетная высота ветровой волны от 0,7 до 2 м; грунты, слагающие откос, песчаные и глинистые; толщина льда – до 1 м. При высоте волн свыше 2 м в условиях морей и водохранилищ для защиты берега применяется наброска из фасонных блоков: диподов, гексаэдров и тетраподов. Такие блоки обладают хорошей волногасящей способностью и устойчивостью.

Крепление железобетонными и бетонными плитами

Для крепления откосов широко используются железобетонные и бетонные плиты. На рис. 1.29; 1.30 представлены схемы крепления откосов сборными железобетонными разрезными плитами.

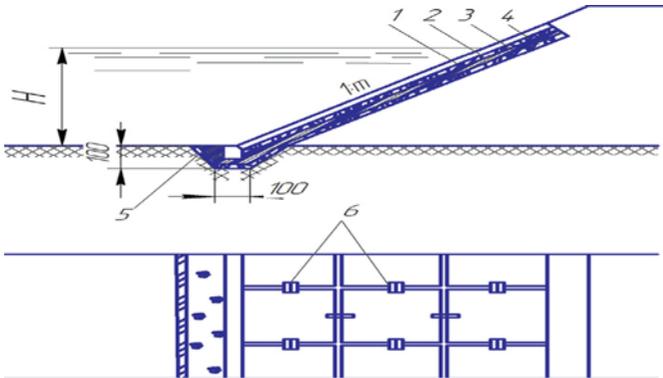


Рис. 1.29. Крепление откосов сборными железобетонными разрезными плитами
1 – сборная железобетонная плита; 2 – крупный щебень; 3 – мелкий щебень или гравий; 4 – крупнозернистый песок; 5 – каменная призма; 6 – шарнирный хомут

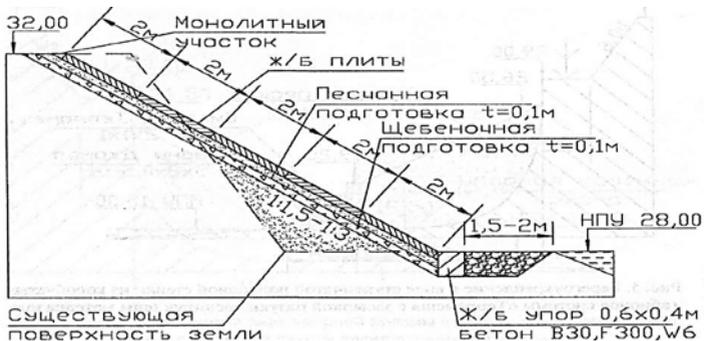


Рис. 1.30. Схема крепления откосов железобетонными плитами

Для такого вида крепления (рис. 1.30) применяются плиты различных размеров и форм: прямоугольные, шестиугольные, ребристые, сплошные и с отверстиями. Плиты 1 укладываются на трехслойный обратный фильтр, нижний слой которого толщиной 10 см состоит из крупнозернистого песка 4, средний (также 10-сантиметровый слой) – из мелкого щебня или гравия 3, а верхний слой толщиной 15 см – из крупного щебня 2.

Между собой плиты скрепляют шарнирными хомутами или сваркой выпусков арматуры. В качестве опоры для плитного берегоукрепления служит каменная призма или железобетонная упорная плита. Такой вид крепления применяют при высоте волн до 1,5 м и толщиной льда до 0,6 м.

Берегозащита в виде волноотбойных стенок

Берегозащитные сооружения в виде тонкой стенки представляют собой ряд свай или шпунта, забитые в ряд плотно друг к другу. Для предотвращения опрокидывания стенки ее часто укрепляют анкерными связями, устанавливаемыми через 3–4 м друг от друга (рис. 1.31).

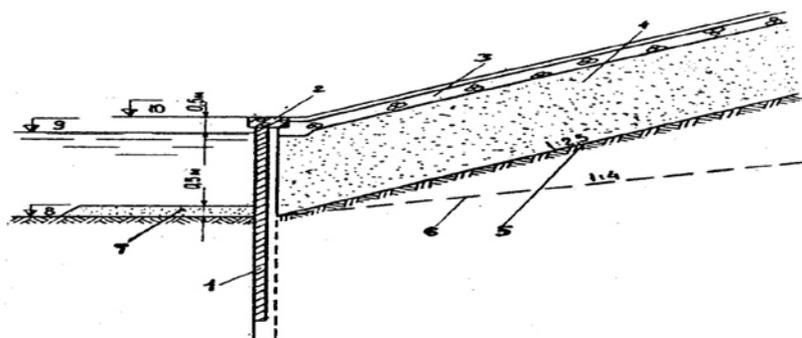


Рис. 1.31. Конструкция берегоукрепления в виде вертикальной стенки:
 1 – железобетонный шпунт; 2 – шапочный брус; 3 – каменное покрытие;
 4 и 7 – подсыпка из песка; 5 и 6 – поверхности откосов из песчаного
 и глинистого грунта; 8 – проектное дно; 9 – средний строительный уровень;
 10 – уровень забивки стенки

Вертикальные стенки применяются в виде безанкерных заградительных рядов из металлического или железобетонного шпунта (рис. 1.32).



Рис. 1.32. Металлическая волноотбойная шпунтовая стенка

На морских побережьях строят массивные бетонные стены; для более эффективного отражения волн поверхность стены, обращённую в сторону акватории водоема, делают криволинейной по высоте. В ряде случаев роль берегоукрепительных сооружений выполняют городские набережные различных конструкций.

Для защиты берегов в настоящее время применяют вертикальные стенки из незаанкеренного или заанкеренного железобетонного шпунта. Конструкция берегоукрепления в виде вертикальной стенки из незаанкерованного шпунта таврового сечения, разработанная институтом «Гипроречтранс», рекомендована для грунтов, допускающих забивку шпунта при высоте подводного крепления до 3,5 м и высоте волны от 0,7 до 2,0 м.

Изначально их конструкция была в виде каменной кладки с вертикальной передней гранью без использования фундамента. Впоследствии, происходили изменения конструкций стен, тем самым увеличивалась их несущая способность.

Глава 2

УСТОЙЧИВОСТЬ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВ И СООРУЖЕНИЙ БЕРЕГОЗАЩИТЫ НА ВОДОЕМАХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

2.1. Исследование устойчивости креплений берегов и откосов на водохранилищах страны

Экспериментальными исследованиями устойчивости и надежности подпорных сооружений дамб, плотин, а также креплений их откосов в Беларуси – стране с развитым водохозяйственным и мелиоративным комплексом наиболее активно занимались в период 50-х годов XX века и начала 2015-х годов.

Исторически сложилось, что водохозяйственную науку в стране возглавлял «альма-матер» белорусских гидротехников – Белорусский политехнический институт (БПИ), позже названный в период перестройки – Белорусской государственной политехнической академией (БГПА), а в период независимости Беларуси – Белорусским национальным техническим университетом (БНТУ). Формирование водохозяйственной отрасли страны в конце XX века потребовало решение ряда фундаментальных и прикладных научных задач и сложных водохозяйственных проблем. Учитывая сложившуюся ситуацию, связанную с решением ряда важных водохозяйственных проблем и проблем в области мелиорации Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР в г. Минске были созданы два научно-исследовательских института: Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР) и Белорусский научно-исследовательский институт мелиорации и водного хозяйства (БелНИИМиВХ). В результате формирования государственных научно-технических Программ было определено разделение тематик и сфер деятельности указанных организаций. Так БНТУ, занимался водно-эрозионными процессами на водохранилищах,

а также креплениями откосов. Это направление на кафедре гидротехнического строительства возглавил кандидат технических наук, доцент Е. М. Левкевич. Руководили кафедрой в различные годы исследований К. И. Шимко, И. В. Филиппович, Г. Г. Круглов, В. В. Ивашечкин (рис. 2.1).



К.И. Шимко

И.В. Филиппович

Г.Г. Круглов

В.В. Ивашечкин

Рис. 2.1. Заведующие кафедрой гидротехнического строительства

Следует отметить, что практически все исследования, проводимые в БНТУ, ЦНИИКИВР и БелНИИМиВХ являлись комплексными и включали в себя, как правило, компоненты, связанные с физическим, математическим и прочими видами моделирования. Так в ЦНИИКИВР были созданы гидрозал с лабораторными установками, гидравлическими лотками, бассейнами и открытая русловая площадка (рис. 2.2).

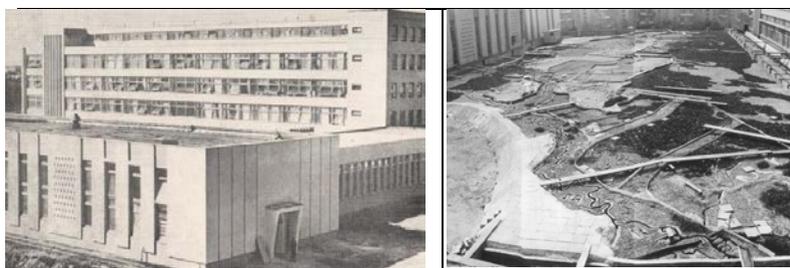


Рис. 2.2. Здание ЦНИИКИВР и открытая русловая площадка

Аналогичные условия были созданы и в БелНИИМиВХ, оснащенным уникальным русловым лотком с переменным уклоном, позволяющий моделировать русловые процессы практически в масштабе 1:1. К великому сожалению с развалом СССР, как в ЦНИИКИВР, так и в БелНИИМиВХ лабораторные базы были полностью уничтожены, а исследования по данной тематике практически свернуты.

Несколько по другому и более «счастливо» сложилась судьба гидротехнической лаборатории БНТУ. Учебная лаборатория, созданная в конце 50-х годов XX века, была полностью сохранена в период перестройки и сейчас является одной из немногих в стране и пожалуй единственной, где возможно проведение физического моделирования и исследований волновых процессов.

В стенах гидротехнической лаборатории БПИ (БНТУ) в результате экспериментов в волновых лотках в разные годы были получены уникальные данные, которые легли в основу ряда диссертаций: к.т.н. Е. М. Левкевича, к.т.н. В. Н. Юхновца, Г. П. Сапожникова, к.т.н. Н. В. Сурмы, к.т.н. П. М. Богославчика, а также д.т.н. В. Е. Левкевича и аспирантов последнего (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Преподаватели БНТУ, проводившие исследования в гидротехнической лаборатории в волновых лотках

Долгие годы заведовали материальной базой и обеспечивали проведение лабораторных экспериментов и натурных на-

учных исследований заведующие лабораторией И. И. Меньшиков и С. И. Архангельский (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Заведующие гидротехнической лабораторией БНТУ

Уникальность данной лабораторией заключается в том, что в конце 50-х годов XX века при ее создании по инициативе к.т.н. Е. М. Левкевича были построены два волновых лотка (большой и малый), позволяющие моделировать комплексное воздействие волнового и урванного режимов на устойчивость откосов и их креплений (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Волновые лотки гидротехнической лаборатории БНТУ

В начале 70-х годов XX века возникла практическая необходимость в исследованиях устойчивости верховых грунтовых откосов сооружений рыбоводных прудов, а также берегозащите путем использования различного типа волноломов и биологического крепления.

Для решения поставленной задачи во внутреннем дворе главного корпуса БНТУ по предложению Е. М. Левкевича рядом с лабораторией на русловой площадке был построен уникальный (даже для масштабов Советского Союза) волновой бассейн, позволяющий моделировать деформации откосов практически в условиях приближенных к натурным (рис. 2.6).

Аналогичная установка была создана в тот период лишь в Институте гидромеханики Академии наук Украины.



Рис. 2.6. Место расположения волнового бассейна во дворе корпуса №1

Размеры волнового бассейна на момент строительства, составляли $25,0 \times 5,0 \times 1,50$ м. Такие габариты экспериментальной установки, при глубине наполнения бассейна до 1,0 м, позволяли получать волны высотой до 30 см и длиной до 3,0 м, т. е. воспроизводить практически реальные параметры ветрового волнения, наблюдаемого в натуральных условиях водохранилищ

страны. Волнение генерировалось с помощью уникального созданного в БНТУ волнопродуктора с электроприводом (рис. 2.7).

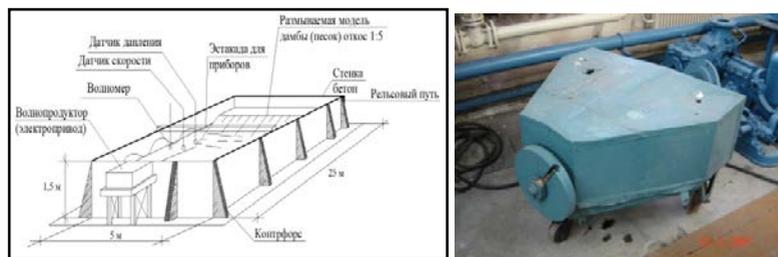


Рис. 2.7. Схема волнового бассейна и волнопродуктор

Экспериментальная база, созданная благодаря инициативе Е. М. Левкевича при поддержке заведующих кафедрой и руководства БПИ давала возможность проводить эксперименты, связанные с моделированием как волновых так и береговых процессов фактически без искажения масштабов с последующим переносом полученных результатов экспериментов в натурные условия и проектные решения. Основным потребителем «услуг» лаборатории являлись проектные институты республики: «Белгипроводхоз» (г. Минск), «Союзгипромелиоводхоз» (г. Пинск), а также Гидропроект им. С. Я. Жука, Гипроречтранс (г. Москва), а также Минводхоз СССР, Министерство рыбного хозяйства, Министерство речного транспорта, Минэнерго. Так, на этой установке проводились исследования биологической защиты и крепления откосов путем посадки ивняка и других бустрорастущих древесных культур, а также крепления откосов фашинами и волноломами, которые использовались в дальнейшем при берегозащите на Любанском, Краснослободском и Солигорском водохранилищах. Созданная лабораторная база требовала наличия высокоточного измерительного и регистрирующего оборудования, позволяющего получать достоверные результаты. Левкевичем Е. М. совместно с коллегами был разработан приборно-измерительный комплекс в состав

которого вошли: оригинальные тензометрические датчики давления и скорости волнового потока, электроволномер БПИ-2 и многоканальный усилитель сигналов (рис. 2.8; 2.9).



Датчик волнового давления



Датчик скорости

Рис. 2.8. Датчики давления и скорости приборно-измерительного комплекса

Комплекс представлял БПИ на Всесоюзной выставке достижений народного хозяйства (ВДНХ), где и был отмечен серебряной медалью.

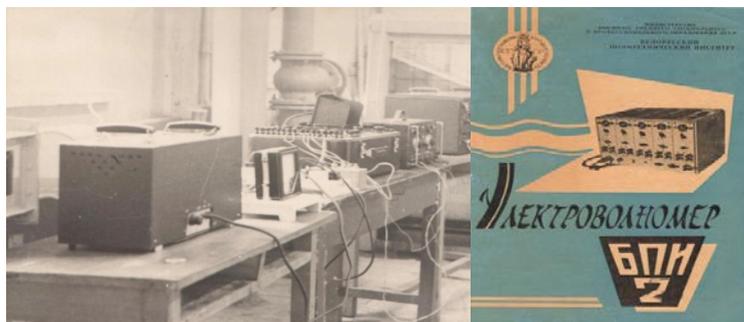


Рис. 2.9. Приборно-измерительный комплекс БПИ-2

К сожалению, в конце 70-х годов XX века уникальная волновая установка была демонтирована. Бурное развитие малой гидроэнергетики, строительство рыбоводных комплексов в республике, реконструкция береговой линии ряда водохранилищ (Заславль-

ского, Лепельского и др.), развитие мелиорации и освоение Полесья, строительство Вилейско-Минской водной системы с каскадом гидроузлов, трасс водного слалома и второго водовыпуска из Заславского водохранилища явилось основой для проведения кафедрой ГТС большого объема как лабораторных, так и натуральных полевых исследований. Тематика исследований касалась прежде всего оценки масштабов и динамики процесса разрушения естественных берегов водных объектов: водохранилищ и прудов, а также изучения механизма разрушения креплений откосов и берегозащиты. Натурные исследования явились базой и первоосновой для лабораторных экспериментов. Для решения ряда задач проводились экспедиционные исследования. Много лет в состав экспедиций входил транспорт автобазы БПИ, это специально выполненный «под заказ» для нужд кафедры экспедиционный автобус марки РАФ производства Рижского автомобильного завода и автомобиль повышенной проходимости ГАЗ-69 (рис. 2.10). Неизменно использовались плавсредства – складные и надувные лодки, а также оборудование для изучения ветрового волнения (волномерные веши с пишущими осциллографами, ветромерным оборудованием и др.), а также геодезические приборы.



Рис. 2.10. Экспедиционный транспорт гидротехнической лаборатории

Первые полевые натурные исследования креплений откосов и их устойчивости относятся к периоду ввода в эксплуатацию Лепельского, Осиповичского и Заславского водохранилищ, создан-

ных для целей гидроэнергетики. Начало исследований было положено в 1956 –1959 годах и включало тотальное обследование всей береговой линии водоемов с определением участков, подверженных разрушению – абразии, разбивке сети поперечников и установке реперов, созданию сети стационарных наблюдений. Наблюдения по данным водохранилищам проводятся и в настоящее время. Созданная сеть наблюдений за формированием берегов водохранилищ БССР явилась первой в республике и единственной на малых водохранилищах СССР (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Разрушение крепления берегов Лепельского водохранилища (1962 г.)

Обобщение материалов натурных обследований по оценке устойчивости берегозащитных сооружений на водоемах республики и изучению механизма разрушения плит креплений откосов позволили Е. М. Левкевичу и Н. В. Сурме разработать новый тип покрытий откосов в виде перфорированных железобетонных плит (рис. 2.12) [1,2]. Практика показала, что эффективность такого кре-

пления очень высока, оно обеспечивает как гашение наката волны на откосе, так и разгрузку волнового давления под плитами в прирезовой зоне и сохраняет целостность грунта откоса.

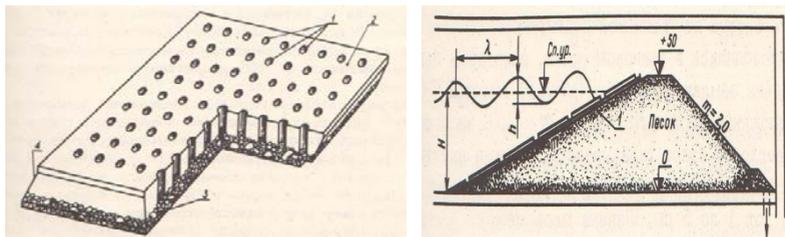


Рис. 2.12. Общий вид перфорированной плиты и схема проведения

Параллельно исследованиям устойчивости креплений от традиционных берегоформирующих факторов: волнения, колебания уровней в водоеме изучалась фильтрация, возникающая в откосах с оценкой ее воздействия на масштаб и интенсивность разрушения тела модели. В 90-е годы XX века лаборатория перешла к освоению новых технологий моделирования, новой приборной базе, компьютерным технологиям измерения. Было проведено моделирование распределения скоростей внутриводоемных и стоковых течений в водохранилищах каскада Вилейско-Минской водной системы (ВМВС) (рис. 2.13) и оценено их влияние на устойчивость берегов и крепления откосов [3].



Рис. 2.13. Проведение исследований внутриводоемных течений на модели каскада водохранилищ ВМВС

2.2. Берегозащитные сооружения и крепления откосов, используемые на водохранилищах республики

Как известно [3, 4], для защиты верховых откосов дамб и плотин, а также размываемых берегов водохранилищ проводятся различные типы берегозащитных мероприятий. В условиях водохранилищ Беларуси используются как активные, так и пассивные способы берегозащиты. Наиболее широко в условиях Беларуси применяются волнозащитные и волногасящие типы сооружений.

Берегозащитные сооружения активного типа

Активные берегозащитные сооружения в республике представлены: волноломами и молами различных конструкций, а также искусственными намытыми или отсыпанными пляжами, которые изменяют структуру волнового потока и стокового течения в береговой зоне [5–12].

Волноломы и молы

Берегозащитные сооружения активного типа: волноломы и молы конструктивно в условиях Беларуси выполнены по одинаковой схеме. Все они без исключения представляют собой сооружения гравитационного типа, выполненные с откосами покрытыми бетонной стяжкой либо из грунта. Волнолом – это сооружение, которое не соединяется с берегом, но осуществляет разрушение и изменение структуры ветрового волнения. В Беларуси волноломы оградительного типа эксплуатируются на Вилейском и Заславском водохранилищах. Волноломы, эксплуатируемые на этих водных объектах более 45 лет, представляют собой сооружения откосного типа в виде безнапорных дамб, с защитным железобетонным покрытием откосов. Заложения откосов составляют 1:3, реже 1:2,5. Берегозащитные волноломы плавующего типа применялись в порядке эксперимента на Любанском и Солигорском водохра-

нилищах. Они изготавливались из отдельных бревен или пакетов бревен, расположенных параллельно урезу воды, заанкеренных тросами. На некоторых водохранилищах (рыбхозы – Белое, Тремля, Волма и др.) применялись подводные волноломы в виде тонких стенок. Наряду с волноломами в качестве берегозащитного сооружения на водохранилищах применяются молы. Молы также гравитационного типа, выполнены из каменной наброски с железобетонным покрытием откосов (рис. 2.14).



Рис. 2.14. Берегозащитные волнолом и мол. Заславское водохранилище

Буны

Наряду с волноломами и молами для перехвата и регулирования вдольберегового потока наносов и режима их аккумуляции используются буны (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Буны. Любанское водохранилище

Буны в условиях водохранилищ Беларуси применяются крайне редко. Данные конструкции использованы в условиях относительно крупных водохранилищ: Селец, Погост, Любанское, Заславское. Выполнены они, как правило, из железобетонных блоков или каменной наброски (рис. 2.15).

Искусственные пляжи и уположенные верховые откосы

Искусственные пляжи и уположенные верховые откосы 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, Волковичи, Солигорское, Дубровское, Вяча и ряд др.) и хорошо себя зарекомендовали в эксплуатации. Общая их протяженность по всем водохранилищам Беларуси, по оценке автора, составляет около 150 км. В табл. 2.1 приведены некоторые характеристики берегозащитных пляжей, находящихся в эксплуатации [13–15].

Таблица 2.1

Характеристика обследованных берегозащитных пляжей

Название водохранилища	Грунт, отсыпaeмый на откос	Ширина пляжа, м		Коэффициент откоса, m_2
		Надводная	Подводная	
Браславское	Крупный песок	10–30	10–15	30–50
Криницы	Средний песок	5–10	5–7	7–10
Вяча	Средний песок	5–30	5–15	7–30
Волковичи	Мелкий песок	15–30	7–12	10–15
Дубровское	Средний песок	10–15	10–15	7–10
Раубичи	Средний песок	10–15	10–15	7–10
Солигорское	Мелкий песок	10–15	10–15	10–15
Головное	Средний песок	7–10	5–7	7–15
Петровичское	Мелкий песок	10–15	7–10	7–10
Карачунка	Мелкий песок	10–15	10–15	7–15
Бобруйковское	Мелкий песок	15–25	15–20	10–15

На ряде объектов осуществлено строительство отмеченных типов подпорных сооружений, которые достаточно хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации. Так, сооружения распластанного профиля применены при строительстве водохранилищ Селец на р. Ясельда, Рудня, Зельва, Левки, Горочичи, Загатье, Муровно и ряде других.

Строительство сооружений такого типа осуществляется преимущественно с применением сухоройных механизмов, реже – с использованием гидронамыва, например, водохозяйственный комплекс на р. Ясельда. Сооружения, отмеченные выше, привлекают строителей технологичностью, простотой, экономичностью по сравнению с дамбами и плотинами обжатого профиля и креплением верхового откоса.

Кроме того, сооружения распластанного профиля могут возводиться на слабых основаниях. Это особенно важно в случае строительства сооружений в зоне Полесья и в сходных геологических условиях. Искусственные пляжи как сооружения инженерной защиты также достаточно часто применяются в практике берегозащитных мероприятий страны (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Искусственные пляжи и уположенные откосы

Дамбы обвалования используются в качестве защитного мероприятия при отчленении образовавшихся мелководий на водохранилищах руслового типа (Вилейское, Заславское, Дрозды, Солигорское, Красная Слобода) или же при строительстве водных объектов наливного типа (водохранилища Загатье, Смоленичское, Коммунар и т.д.). Высота дамб обвалования варьиру-

ет в широких пределах и редко превышает 5,0–7,0 м. Профиль дамб обвалования – наиболее часто распластанный, с суженным верховым откосом,

На сооружениях распластанного профиля в период эксплуатации происходят местные размывы верховых откосов, обусловленные различными причинами. Так, натурные исследования, выполненные автором по 18 водохранилищам страны [13–15] 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 урванного 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 м³/м. пог. Для прогноза деформаций откосов используются известные методики [4–15], которые позволяют рассчитать возможную переработку откоса, ее интенсивность в течение первых лет эксплуатации и по ней, при необходимости, подбирать крепление исходя из местных условий и технико-экономической целесообразности [13].

Верховые уположенные откосы без защитных устройств могут, по предложениям [8, 9], проектироваться с учетом возможной переработки откоса, а устойчивая форма профиля подбираться с учетом возможных деформаций.

Сооружения берегозащиты пассивного типа

К *пассивному* типу сооружений [13–15] следует отнести, одежды естественных береговых склонов (каменная наброска, мощение, сборное железобетонное и монолитное бетонное, ас-

фальтобетонное крепление и синтетическое покрытие в виде покрышек) крепление откосов напорных сооружений, волноотбойные стенки и биологическое крепление.

Каменная наброска и мощение

На водохранилищах Беларуси для защиты верховых откосов плотин и дамб, а также естественных, подвергаемых переработке берегов, применяются различные типы креплений, некоторые из которых эксплуатируются более 30 лет (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Существующие пассивные берегозащитные сооружения

Водохранилище	Год ввода в эксплуат.	Глубина, средняя/максимальная, м	Тип сооружения	Тип крепления	Длина разгона волны, км
Заславское	1957	3,5/8,0	Плотина	Монол.	5,0
Криница	1975	1,5	Плотина	Плита	1,0
Осповичское	1953	1,5/8,5	Плотина	Монолиты	1,5
Птичь	1967	3,3/9,0	Плотина	Мощение	1,2
Солигорское	1968	2,5/5,0	Плотина	Монолиты	10,0
Любанское	1966	1,7	Плотина	Монолиты	3,0
Вилейское	1973	5,9/9,0	Плотина	Монолиты	10,0
Лепельское	1953	1,0/2,7	Плотина	Монолиты	3,5
Войковское	1952	2,5	Берега	Мощение	2,9

Каменная наброска использовалась при креплении берегов и откосов плотин на водохранилищах Заславском, Чижовском (до реконструкции) и Осиповичском (рис. 2.17). Использовался камень диаметром до 30 см. Каменные крепления типа мостовой при небольших разгонах волны 0,4–0,6 км находятся в хорошем состоянии и являются надежной защитой откосов. Однако, в случае разгонов волны более 1,5–2,0 км (Заславское, Чижовское, Осиповичское водохранилища) откосы ограждающей дамбы, закрепленные каменной мостовой были разрушены.

На плотине Осиповичского водохранилища также было применено каменное мощение из камня диаметром 25–35 см



Рис. 2.17. Крепление откосов каменной наброской

Бетонные и железобетонные крепления

Бетонные и железобетонные покрытия применяются в виде как монолитных плит, бетонируемых на месте, так и сборно-монолитных. В соответствии с [2, 4, 8–15] монолитные крепления выполняются из плит толщиной до 20 см на слое гравия 10–15 см. Плиты разрезаются температурно-осадочными швами по всей высоте откоса. Расстояние между швами 5–10 м. Сборно-монолитные крепления выполнены из отделочных плит размерами $4,0 \times 1,75$ м. Слой гравийной подготовки до 20 см (рис. 2.18; 2.19).

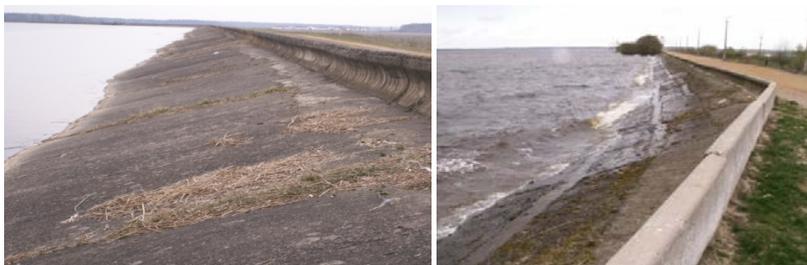


Рис. 2.18. Крепление откосов сборно-монолитными железобетонными плитами

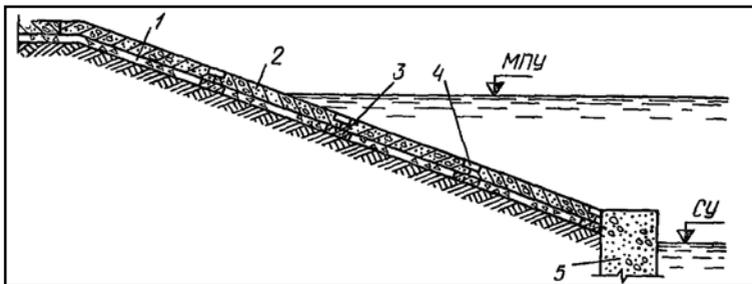


Рис. 2.19. Крепление железобетонными плитами (омоноличенными)
 1 – подготовка из разнозернистого гравия; 2 – сборные железобетонные плиты; 3 – железобетонная доска; 4 – узел омоноличивания; 5 – упорный пояс

Обследование объектов с различными типами креплений показало, что бетонные и железобетонные крепления за время эксплуатации зарекомендовали себя как надежное средство защиты откосов. Однако, под воздействием внешних воздействий (ветро-волновых, ледовых и температурных) может происходить разрушение железобетонных креплений и потеря местной и общей устойчивости грунтового откоса.

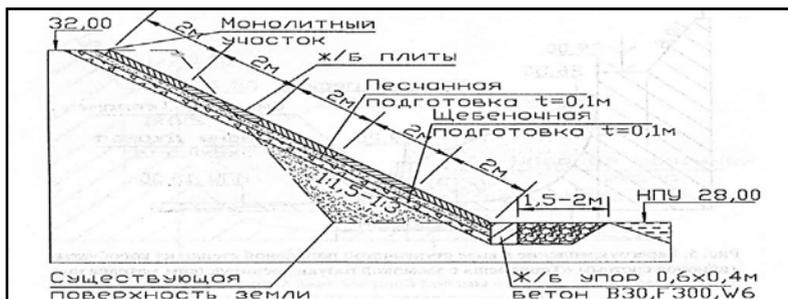


Рис. 2.20. Крепление откоса железобетонными плитами

Все крепления из монолитного бетона конструктивно выполняются по обычной схеме с устройством обратного фильтра,

осадочных и строительных швов, анкеров и других конструктивных элементов (рисунок 2.21).

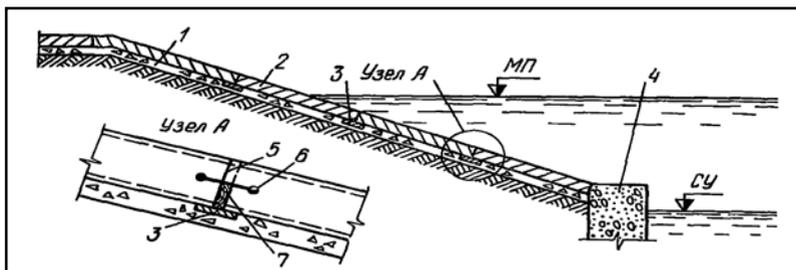


Рис. 2.21. Откосные покрытия плитами из монолитного железобетона
 1 — щебеночная подготовка; 2 — монолитные плиты; 3 — железобетонная доска; 4 — упорный пояс; 5 — два слоя гидроизола; 6 — кулачковая резина; 7 — деревянная доска

Наряду с монолитными и сборно-монолитными креплениями применяются, но достаточно редко (обычно на наливных водохранилищах), крепления из решетчатых плит с заполнением ячеек камнем или же грунтом с посевом трав (рис. 2.22; 2.23).

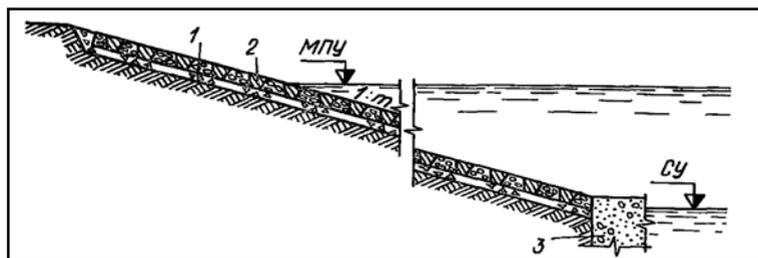


Рис 2.22. Решетчатые плиты с заполнением ячеек камнем
 1 — щебеночная подготовка; 2 — сборные железобетонные решетчатые плиты; 3 — упорный пояс

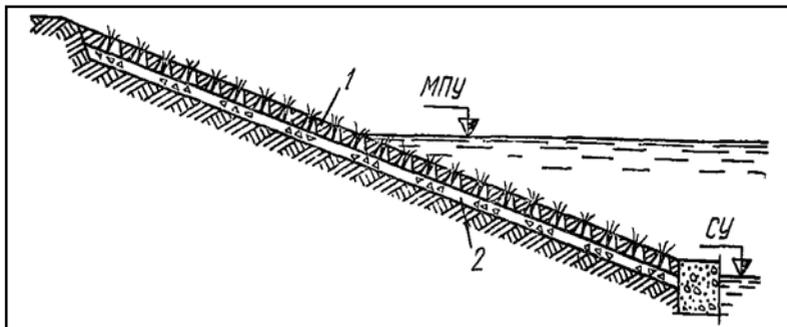


Рис. 2.23. Решетчатые плиты с заполнением ячеек растительным грунтом с посевом трав

1 — решетчатые плиты с заполнением ячеек растительной землей с посевом трав; 2 — щебеночная подготовка

Крепление откосов и волнобойными стенками

Волнобойные стенки, выполненные из монолитного железобетона в настоящее время находятся в хорошем состоянии на водохранилищах Криницы, Дрозды, Цянское, Комсомольское озеро. Волнобойная стенки из металлического шпунта выполнены также на Заславском водохранилище и Гезгальском водохранилище. На малых водохранилищах волнобойные стенки выполненные из металлического шпунта используются редко.

Конструктивные решения по устройству подпорных стен из металлического шпунта бывают самыми различными. Расчет стенок также как и бетонных креплений производится по известным методикам и в настоящей книге не рассматриваются. Следует отметить, что при шпунтовом берегоукреплении сокращаются до минимума объемы земляных работ и объемы работ по установке шпунта в различных погодных и сезонных условиях.

Волноотбойные стенки, эксплуатируемые на водохранилищах Беларуси подвержены осадочным деформациям и

разрушаются. В качестве примера можно привести волноотбойную стенку на Лепельском водохранилище (рис. 2.24).



Рис. 2.24. Лепельское водохранилище. Волноотбойная стенка

Очень редко вертикальные волноотбойные стенки совмещают с набережной, в качестве примера можно привести реконструкцию береговой зоны на Комсомольском озере в г. Минске (рис. 2.25).



Рис. 2.25. Набережная и волноотбойная стенка совмещенного типа.
Комсомольское озеро

Крепление откосов автопокрышками и асфальтобетоном

В 70-е годы XX века было широко распространено крепление откосов и берегов водоемов отработанными покрышками в сочетании с засыпкой горной массой или щебнем (рис. 2.26).



Рис. 2.26. Крепление откосов тьюфками из отработанных автопокрышек

В порядке эксперимента на Заславском и Лепельском водохранилищах была применена технология берегозащиты асфальтобетонным покрытием (рис. 2.27).



Рис. 2.27. Разрушенное крепление из асфальтобетонного покрытия

Всего было защищено на Заславском водохранилище около 1 км, а на Лепельском около 300 м береговой линии и откосов ограждающих сооружений. Однако эксплуатация крепления из асфальтобетона показала, что данный тип защиты откосов мало эффективен в условиях Беларуси из-за влияния на прочностные характеристики покрытий температурных перепадов и нагрузок, оказываемых ледовыми явлениями.

Биологическое крепление берегов и верховых откосов

Натурные наблюдения и обследования *биологических типов* креплений подтвердили ранее полученные результаты лабораторных исследований эффективности биологического крепления, проведенные в БПИ в 70-е годы XX века. Они показали, что в надводной части склона такой тип крепления себя оправдывает, однако в подводной части откоса его защитная функция резко ухудшается и в условиях волн, имеющих высоту более 0,5 м практически не работает. Примером этому служит биологическое крепление плотины Краснослободского водохранилища, которое совершенно не препятствует развитию абразии.

Параллельно с БПИ в институте БелНИИМиВХ проводились экспериментальные натурные исследования по подбору биологического крепления откосов. Группой специалистов БелНИИМиВХ в составе: заведующего лабораторией к.т.н., с.н.с. Ф. В. Саплюкова и с.н.с. Е. С. Ленартович выполнялись работы по акклиматизации к условиям Беларуси дальневосточного дикого риса. К сожалению, дальше экспериментов на водохранилище Красная Слобода и некоторых рыбоводных прудах эти работы не получили развития в связи с высокой трудоемкости ручной посадки риса и низкой приживаемости саженцев [13–15].

В этом же институте в это же время фундаментальные исследования по креплению откосов каналов, рек и водоемов с помощью гидропосева трав проводил доктор технических

наук, профессор В. Н. Кондратьев [9]. В результате исследований им была предложена инновационная технология по креплению откосов травяными смесями, высеваемыми с помощью гидросеялок различных конструкций.

Биологические крепления верховых откосов в виде посева трав наиболее часто используется на уположенных откосах плотин и дамб обвалования наливных водохранилищ.

Глава 3

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СОСТОЯНИЕ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВ И ОТКОСОВ ПОДПОРНЫХ И ОГРАЖДАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

Проведенное обследование подпорных сооружений на водохранилищах страны показало [1–12], что одной из причин образования повреждений бетонных и железобетонных креплений являются некачественное уплотнение швов и гравийной подготовки, что в итоге приводит к выносу грунта из-под плит и их последующему разрушению, потере местной устойчивости креплений и защищаемого берега (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Повреждение железобетонного монолитного крепления откосов

Примером разрушения бетонного крепления в процессе эксплуатации может служить берегозащитное сооружение на Лепельском водохранилище. При создании Лепельского водохранилища в первые годы эксплуатации на участках берегов, подверженных переработке, были возведены различные типы берегозащиты и крепления берегов. Были возведены: волнобойные стенки, крепление бетонными плитами, каменной отсыпкой, а также асфальтобетоном. Эксплуатация креплений показала, что наиболее эффектив-

ными и прочными оказались крепления, выполненные из железобетонных плит. Однако, в ряде случаев в результате раскрытия строительных и температурно-осадочных швов происходит интенсивное вымывание грунта и материала подготовки из-под железобетонных плит, что ведет к разрушению креплений.

Ниже на рис. 3.2; 3.3 представлены типичные примеры повреждения крепления берегов и откосов сборно-монолитными и монолитными железобетонными плитами, наблюдаемые в условиях страны, которые зарегистрированы автором при натурном обследовании ряда водных объектов.



Водохранилище Чигиринское



Заславское водохранилище

Рис. 3.2. Характерные разрушения сборно-монолитных и сборных креплений



Рис. 3.3. Крепление берега на Смолевичском и Лепельском водохранилищах

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 2013–2018 гг., оценена в пределах 110 км, что составляет около 45% протяженности всех креплений. В табл. 3.1 приведены наиболее часто встречаемые виды деформации креплений, а также причины их возникновения.

Таблица 3.1

Виды деформаций креплений откосов

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 верхних 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
Лощанское (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

Продолжение таблицы 3.1

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	Вывос 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 асфальтового 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

Несомненно, что наряду со «стандартными» причинами разрушения, которые приведены в табл. 3.1, возможно возникновение и отличных от общепринятых причин. Например, сочетание форсированного уровня в верхнем бьефе водохранилища и сильного ветрового волнения, а также совместное воздействие динамических нагрузок от навала льда в сочетании с повышенными отметками в верхнем бьефе и др.

Как указывалось сооружения инженерной защиты «активного» типа в виде берегозащитных пляжей и уположенных откосов, наиболее часто применяются в практике. Характерным примером этого является каскад водохранилищ Вилейско - Минской водной системы (ВМВС). Общая протяженность сооружений этого указанного типа креплений по всем водохранилищам ВМВС по оценке автора составляет около 20 км. Ниже в табл. 3.2 приведены некоторые характеристики берегозащитных пляжей, находящихся в эксплуатации.

Таблица 3.2

Характеристика обследованных берегозащитных пляжей водохранилищ Вилейско-Минской водной системы

Название водохранилища	Грунт, отсыпаемый в откос	Ширина пляжа, м		Коэффициент откоса, m_2
		Надводная часть	Подводная часть	
Заславское	средин. песок	5...10	15...45	23...35
Криницы	средин. песок	5...10	5...7	7...10
Дрозды	крупн. песок	5...10	5...7	10...30

При всех несомненных достоинствах сооружения распластанного профиля в ряде случаев подвержены значительным деформациям верховых откосов, появление которых обусловлено различными причинами:

- наличием в принятых расчетных схемах верховых откосов дамб и плотин и зависимостях значительных допущений;
- не полный учет условий волнообразования в сочетании с

характером регулирования стока и уровня в водоеме;

- в применении некорректных исходных данных, материалов изысканий в которых не всегда присутствует достоверная информация о грунтовых условиях;
- в технологических отклонениях, возникающих при строительстве сооружений.

Дамбы обвалования используются в качестве защитного мероприятия от затопления к образованию мелководий на водохранилищах и прудах руслового типа (водохранилища «Вилейское», «Заславское», «Дрозды», ТЭЦ-3, Дрозды). Высота дамб обвалования варьирует в широких пределах и редко превышает 5–7 м.

Профиль дамб обвалования – наиболее часто распластанный, с уположенным верховым откосом, реже обжатого типа с одеждой крутостей в виде бетонных или железобетонных покрытий. Сооружения распластанного профиля могут возводиться на слабых основаниях и часто, подвержены деформациям [11–26].

Деформации незакрепленных грунтовых верховых откосов дамб и плотин по данным наблюдений и по укрупненным прогнозным расчетам составляют: линейные от 1,50 до 8,50 м, объемные от 1,50 до 4,25 м³/м. пог.

В последние годы в Беларуси активно ведется реконструкция и модернизация существующих водохранилищ различного хозяйственного назначения, предназначенных для мелиорации, регулирования стока и других хозяйственных нужд, а также для целей энергетики. Параллельно осуществляется строительство ряда новых гидроэнергетических объектов. (Гродненская, Витебская, Полоцкая, Бешенковичская ГЭС). Вопросы берегозащиты и берегоукрепления становятся все более актуальными.

Ниже приведен анализ многолетней эксплуатации креплений естественных берегов и откосов берегозащитных подпорных водохранилищ ВМВС, расположенной в центральной части Беларуси (рис. 3.4).

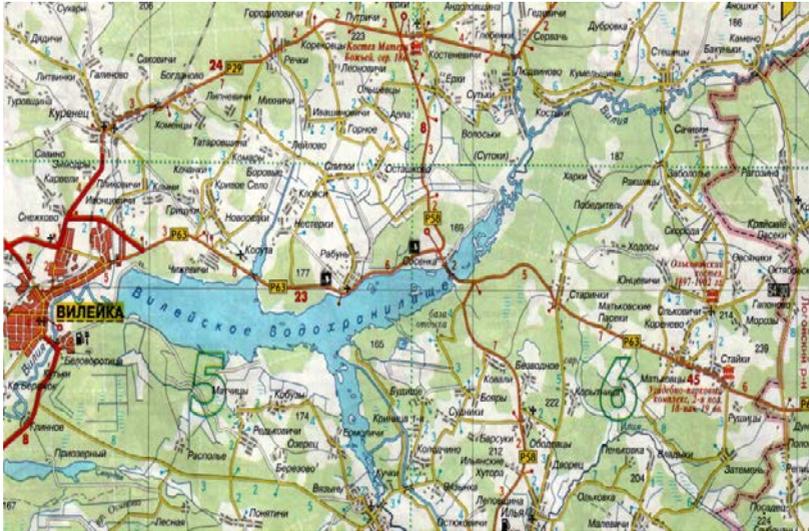


Рис. 3.4. План Вилейского водохранилища

Вилейско-Минская водная система (далее ВМВС), введенная в эксплуатацию в 1976 г. имеет, как отмечалось ранее ряд водохранилищ. Протяженность канала ВМВС составляет около 62 км, а с учетом Осиповичского водохранилища, расположенного ниже г. Минска по течению р. Свислочь на расстоянии более 100 км и являющегося завершающим звеном каскада системы, можно считать, что длина трассы переброски стока близка к 200 км.

В состав системы входит ряд водных объектов и гидротехнических сооружений: головное водохранилище на р. Вилия (рис. 3.4), имеющее полный объем около 240 млн. м³ и площадь зеркала около 65 км²; собственно канал; 5 насосных станций; мостовые переходы и дюкеры; 3 быстротока и каскад водохранилищ на р. Свислочь, включающий водохранилище Заславской ГЭС – «Минское море» – с площадью водного зеркала 31,0 км² и полным объемом 108 млн. м³ (рис. 3.5); водохранилища Криницы, Дрозды, Комсомольское озеро, водохранилище в парке

им. М. Горького г. Минска (рис. 3.6), водохранилище ТЭЦ-2, Чижовское. Также в каскад водохранилищ ВМВС как отмечалось выше, автор включает и водохранилище Осиповичской ГЭС. Ввод в эксплуатацию ВМВС изменил режим регулирования водных объектов, эксплуатация которых до создания ВМВС осуществлялась изолированно по своим диспетчерским графикам в соответствии с проектами.



Рис. 3.5. Заславское водохранилище (Минское море)



Рис. 3.6. Водоохранилище в парке им. М. Горького г. Минска

Ввод в строй системы переброски стока позволил изменить водный режим р. Свислочи, на которой создан каскад водохранилищ, что сразу сказалось как на активизации переработки естественных незакрепленных берегов [27–28] (рис. 3.7; 3.8), так и состоянии берегозащитных и берегоукрепительных сооружений.

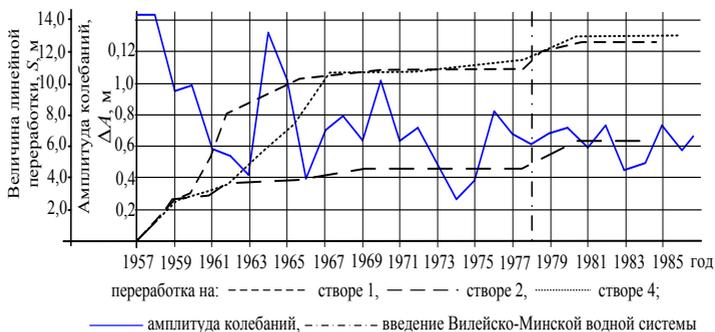


Рис. 3.7. График колебания уровней и интенсивности переработки берегов Осиповичского водохранилища



Рис. 3.8. Переработка береговых склонов на водохранилищах ВМВС

Анализ данных натуральных стационарных многолетних наблюдений показал, что при изменении режима регулирова-

ния и колебания уровней в водохранилище процесс берегоформирования «реанимируется» и начинает развиваться с нового временного базиса в соответствии с известной стадийностью [16–18, 25].

С вводом ВМВС в эксплуатацию при трансформированном уровненом режиме активизируемые абразионные берега водохранилищ которые разрушались ранее, т.е. участки так называемых «старо-абразионных» берегов формирующихся до ввода в эксплуатацию системы переброски стока. Поэтому в общем виде линейная переработка (отступление) таких береговых склонов (S_t) в результате изменения уровненого режима записывается в виде:

$$S_t = S_k + S_k \cdot t^b, \quad (3.1)$$

где S_k – линейная переработка до изменения гидрологических условий водохранилищ, м/год;

b – показатель степени, зависящий от состава размываемого грунта, высоты и формы склона;

t – время эксплуатации, лет.

Наиболее интенсивно процесс разрушения протекает в первые годы эксплуатации водоема, затем скорость переработки резко уменьшается и происходит затухание процесса [16–18, 25]. Ниже в табл. 3.3 приведены фактические данные о линейной переработке берегов по ряда водохранилищ ВМВС до и после изменения их гидрологического режима.

Таблица 3.3

Характеристики абразионных берегов водохранилищ

Водохранилище	Тип водохранилища	Наибольшая линейная переработка (S_t), м	
		до изменения	после изменения
Тип берега – абразионно-осыпной			
Заславской ГЭС	Русловое	17	30
Криница	-//-	-//-	12
Тип берега – абразионно-обвальный			
Осиповичской ГЭС	-//-	10,9	12,5

Площадь территории прибрежной зоны, подверженной переработке F_S (m^2), может быть представлена зависимостью вида:

$$F_S = \sum_{n=1}^{50} (S_{t_{вдхр}} + S_{t_{каск}}) L_{абр,i}, \quad (3.2)$$

где $S_{t_{вдхр}}$, $S_{t_{каск}}$ – линейная переработка берега при различных состояниях водоема: до существования ВМВС и после ввода ВМВС в эксплуатацию, m ;

n – количество створов наблюдений, определяемое протяженностью участка переработки и методикой наблюдений, $шт.$;

$L_{абр,i}$ – длина береговой линии на i -ом участке, подверженной переработке (абразии), m .

Установлено, что на водохранилищах с малыми амплитудами колебания уровня в безледный период (сработка уровня менее 0,5 м) и большой обеспеченностью отметок активных уровней, процесс переработки происходит интенсивнее в 1,5–2 раза по сравнению с большими уровнями и малой обеспеченностью активных уровней, у которых срок окончания составляет примерно 15 лет (рис. 3.9).

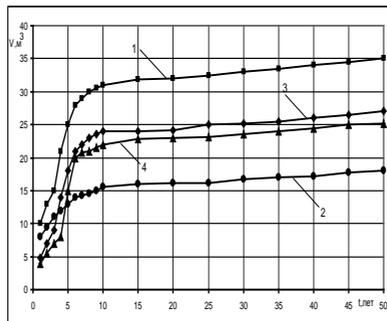


Рис. 3.9. Водохранилище Осиповичско ГЭС. График зависимости $S_t = f(t)$
 1 – створ № 5; 2 – створ № 2; 3 – створ № 3; 4 – створ № 4

Для защиты верховых откосов дамб и плотин, а также размываемых берегов водохранилищ ВМВС были реализованы различные типы берегозащитных мероприятий: активные и пассивные [16–18, 25–27].

Активные берегозащитные сооружения на водохранилищах ВМВС представлены: волноломами, молами различных конструкций, а также искусственными намытыми или отсыпанными пляжами и биологическим креплением откосов, изменяющими структуру волнового потока и стоковых течений в береговой зоне. Были созданы и эксплуатируются на водохранилищах: Вилейском, Заславском, Криницы, Дрозды.

К *пассивному* типу сооружений (водохранилища Вилейское, Заславское, Криницы, Чижовское, Осиповичское) относятся волноотбойные стенки, дамбы обвалования с закрепленным верховым (со стороны акватории водохранилища) откосом, различные одежды естественных береговых склонов (каменное крепление в виде наброски, мощения), сборное железобетонное и монолитное бетонное и синтетическое покрытие откосов напорных сооружений. Каменное мощение устраивается в виде одиночной или двойной мостовой на слое гравия 15...20 см. Каменная наброска использовалась при креплении берегов и откосов плотин на водохранилищах Заславском, Чижовском и Осиповичском. Применялся камень диаметром до 30 см. Ниже на рис. 3.10 показан пример крепления берегов водохранилищ ВМВС.



Рис. 3.10. Крепления откосов и берегов водохранилищ Дрозды

В результате обобщения материалов натурных обследований берегозащитных сооружений и оценки их устойчивости были сформулированы следующие выводы, которые могут быть использованы в практике проектирования, строительства и эксплуатации берегозащитных сооружений на водоемах:

1. Обследования сооружений *берегозащиты* на водохранилищах каскада Вилейско-Минской волной системы позволили выявить характерные причины нарушения устойчивости креплений и провести *оценку современного состояния различных видов покрытий откосов* с выявлением масштабов их деформаций. Определено, что наиболее распространенными типами крепления берегов и откосов являются крепления в виде железобетонных монолитных либо сборных плит.

2. Установлено, что деформации бетонных креплений наиболее часто (70% случаев) представлены раскрытием межплиточных строительных, температурных и осадочных швов (зарегистрирована ширина раскрытия до 0,30 м) которые развиваются под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и других факторов [16 –18, 25 – 27].

3. Практика эксплуатации берегозащитных сооружений показала – наиболее эффективны и экономичны в условиях равнинных водохранилищ дамбы и плотины с уположенным верховыми откосами. Они наиболее устойчивы по отношению к воздействующим берегообразующим гидродинамическим факторам: ветровому волнению, колебанию уровней, течениям, ледовым явлениям. Величины деформаций уположенных грунтовых откосов значительно меньше по масштабам, чем откосов с креплением и более того – расходы на их восстановление несопоставимы с затратами по ремонту креплений из бетона.

4. Эксплуатация берегозащитных сооружений на каскаде водохранилищ Вилейско-Минской водной системы показала необходимость проведения более тщательного контроля за текущим состоянием сооружений, эксплуатируемым при изменившихся гидрологических условиях, вызванных изменением характера регулирования.

Глава 4

ПРОГНОЗЫ ДЕФОРМАЦИЙ БЕРЕГОВ И ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ СООРУЖЕНИЙ, ТРЕБУЮЩИХ КРЕПЛЕНИЯ

В настоящей главе рассмотрены существующие и наиболее распространенные методы прогноза переработки естественных берегов водохранилищ, протекающих под воздействием природных и техногенных факторов, вызванных характером регулирования и режимом колебания уровней в водоемах, а также другими гидрологическими условиями: ветровым волнением, режимом течений и т.д. Процедура прогноза крайне необходима на стадии проектирования водного объекта, а также при определении мероприятий по уменьшению влияния водохранилища на прилегающие территории и их инженерную защиту.

Прогноз динамики берегов водохранилищ необходим для определения границ зоны отселения и зоны ограничения строительства, расположения водозаборов, причалов, мостовых переходов, берегоукрепительных и других сооружений. При определении границ зоны отселения и зоны ограничения строительства по всему периметру водохранилища используется, наиболее часто приближенный или так называемый «фоновый» способ прогноза.

В общем случае исходными данными для прогноза являются сведения о топографии и инженерной геологии берегов и чаши водохранилища, а также сведения о ветро-волновом режиме и режиме колебания уровней в водоеме. Исходными данными по топографии являются карты в масштабе 1:2500–1:25000, в зависимости от размеров водохранилища с горизонталями через 1–5м. Данные о метеорежиме представляются в виде таблиц о скоростях и направлениях ветров по 8 или 16 румбам за все время наблюдений, а также в виде графиков или таблиц повторяемости (обеспеченности) скоростей ветра за безледный период. Характеристика уровненного режима представляется в виде диспетчерских

графиков или в виде таблиц повторяемости (обеспеченности) отметок верхнего бьефа.

Расчетные участки берегов выбираются в пределах населенных пунктов, на мысах и выровненных берегах в характерных по геологическому строению участках побережья. Ниже будут рассмотрены наиболее часто используемые методы прогноза в практике проектирования берегозащитных и берегоукрепительных мероприятий.

***Метод прогноза деформаций берегов Б. А. Пышкина
(Институт гидромеханики Академии наук Украины, г. Киев)***

Данный метод прогнозирования деформаций берегов – переработки склонов, предложенный Б. А. Пышкиным [1] применим для берегов водохранилищ, сложенных рыхлыми породами и является укрупненным и приблизительным. Однако для условий водохранилищ Беларуси данный метод может быть применим лишь в качестве оценочного, т.к. был разработан для крупных равнинных водохранилищ. При прогнозировании деформаций берегов расчетная высота волны (m) определяется по формуле В. А. Марьина:

$$h = 0,37\sqrt{D} , \quad (4.1)$$

где D – длина разгона волны, наибольшая для рассматриваемого участка берега, км (рис. 4.1).

Высота и длина разгона волны определяются для расчетных уровней в водохранилище, каковыми принимаются средние за многолетие уровень верхнего бьефа в безледный период и период ледосава. Определение коэффициента заложения устойчивой отмели (m) для данного типа грунтов и заданной расчетной высоты волны (h) производится по графику (рис. 4.2).

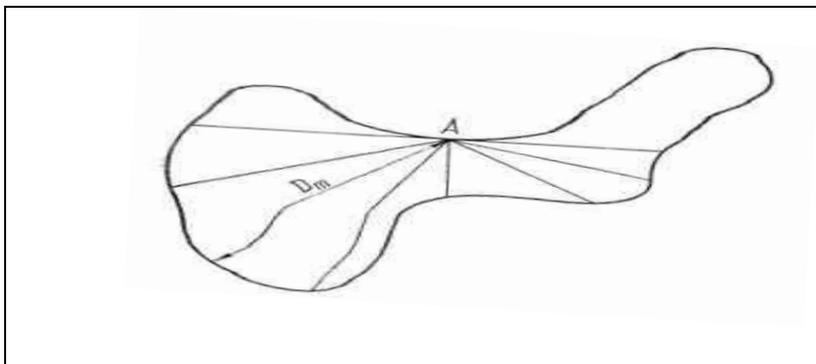


Рис. 4.1. Определение максимальной длины разгона волны для пункта берега А в предположении одинаковой расчётной скорости ветра $\omega = 20\text{ м/с}$ по всем направлениям.

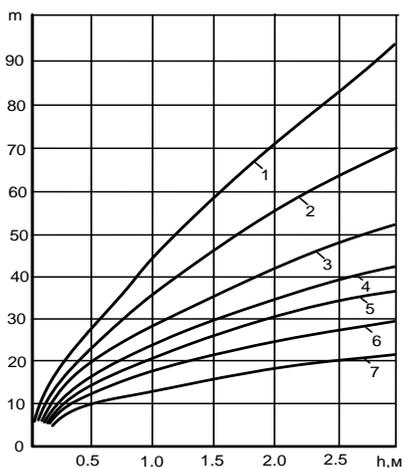


Рис. 4.2. Определение коэффициента откоса устойчивой отмели для различных грунтов:
 1 – глина; 2 – лесс; 3 – суглинок; 4-6 – песок соответственно мелко-, средне- и крупнозернистый; 7 – гравий

переработки берега S_k , на конечную стадию динамического равновесия.

Конечная ширина переработки S_k берега, сложенного однородным грунтом, при постоянном уровне (горизонте) воды определяемая линией abc строится в полном соответствии с изложенным выше (рис. 4.4).

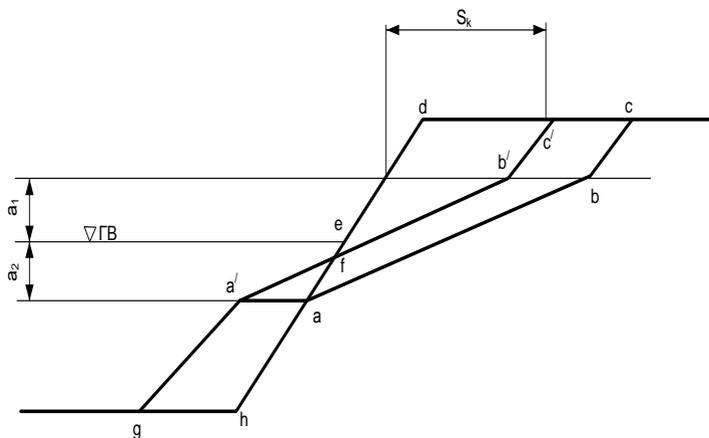


Рис. 4.4. Определение конечной ширины размыва выровненного берега из однородного грунта при постоянном горизонте водохранилища

Контур профиля переработки передвигается параллельно самой себе в сторону воды до положения $a'b'c'$, при котором отношение объёма v_a аккумулятивной призмы, ограниченной контуром $fahgaf$ к объёму v_p размываемого грунта $-fdcbf$ представляется в виде

$$\frac{v_a}{v_p} = \xi, \quad (4.4)$$

где ξ – величина коэффициента аккумуляции определяется по графику (рис. 4.5).

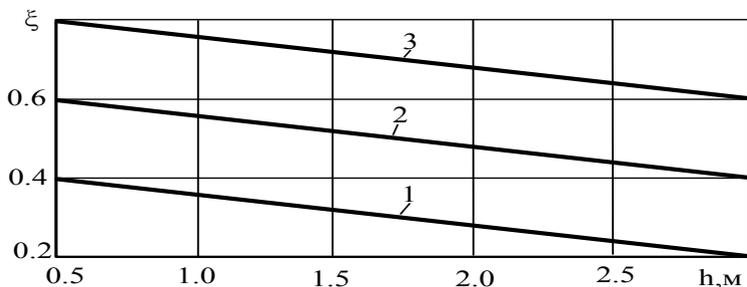


Рисунок 4.5. Зависимость ξ для грунтов, слагающих берег, при различных высотах волны:

1 – глинистые грунты; 2 – песчаные; 3 – галечные.

Линия α/g (рис. 4.4) строится по коэффициенту откоса m_n , определяемому по табл. 4.1.

Таблица. 4.1

Зависимость коэффициента заложения от естественно-го угла откоса для различных типов грунтов

Тип грунта	α_n , град	$m_n = \text{ctg } \alpha_n$
Глина	5–10	5–10
Суглинок	10–15	4–5
Песок	15–20	3–4
Гравий	20–25	2–3
Галечник	25–30	1.5–2

Число лет, за которое произойдет переформирование берега и выработка устойчивого профиля динамического равновесия определяет по формуле

$$T_k = 2 \frac{S_k}{v_{\max}}, \quad (4.5)$$

где v_{\max} – максимальная скорость переработки берега, м/год, определяемая по графику (рис. 4.6).

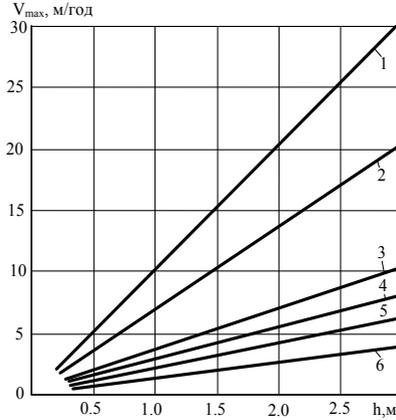


Рис. 4.6. График $v_{max} = f(h, h_6)$ при высоте берега $h_6 < 2$ м:
 1 – лесс; 2 – песок мелкозернистый; 3 – супесь; 4 – суглинок; 5 – глина;
 6 – песок крупнозернистый с валунами

$$v_{max} = k v_{max2}, \quad (4.6)$$

где v_{max2} – максимальная скорость размыва берега, м/год, определяется по графику (рис.4.6). Значения коэффициента k изменяются в пределах от 0,4 при высоте берега 10 – 15 м, до 1,0 при высоте склона 2 – 5 м.

Так как по (4.5) $S_k = 0,5 v_{max} T_k$, то ширина S_T зоны размыва берега за любое число лет T определится по формуле:

$$S_T = v_{max} T \left(1 - 0,5 \frac{T}{T_k}\right), \quad (4.7)$$

Метод прогноза переработки берегов Проектного научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИС, г. Москва)

Метод, предлагаемый для прогноза ветро-волнового размыва берегов водохранилищ, представляет собой систему расчетных и графических операций, выполнение которых позволяет определить величину отступления бровки берега, объемы размываемых грунтов и наносов, откладываемых на свале прибрежной отмели, а также построить соответствующий им прогнозный профиль берега и прибрежной отмели на заданный период времени [2]. Этот период может отсчитываться от начала заполнения или от любого другого момента эксплуатации водохранилища.

Данный метод можно применяется для условий проектируемых и существующих водохранилищах с различным уровнем режимом при разнообразной конфигурации береговой линии, на берегах любой высоты и формы, сложенных несвязными и связными породами. Этот метод прогноза может быть использован для принятия решений о хозяйственном использовании береговой зоны рек и водохранилищ, в частности для определения безопасных сроков эксплуатации и местоположения различных сооружений в береговой зоне, при обосновании целесообразности и сроков выполнения берегозащитных и водоохраных мероприятий, их вида и объема (размеров).

Процедура прогноза переработки берегов водохранилища состоит из восьми этапов.

Первый этап заключается в обработке сведений об уровненом режиме для установления типа водохранилища, определения общих принципов учета влияния уровненого режима;

Второй этап состоит в получении волновых и волно-энергетических характеристик с использованием сведений о ветровом и уровненом режимах и батиметрической карты водохранилища. В результате выполнения операций второго этапа получают следующие характеристики: среднюю высоту волны,

$m - h_m$; волно – энергетические показатели и удельную энергию волн, подходящих к прибрежной отмели – N Дж/год, т.е. ее нормальную N_d и продольную N_l составляющие, а также ту ее часть, которая определяет вдольбереговой поток наносов N_s ; значение доли материала, перемещаемого по нормали от берега κ_d . При необходимости средняя высота волны и нормальная составляющая удельной энергии волн рассчитываются с учетом изменчивости уровня воды для уровней воды заданной обеспеченности.

На *третьем этапе* производятся построение вспомогательного прогнозного профиля береговой зоны в соответствии с произвольно заданным положением бровки берега и положением характерных уровней воды, определяемых в зависимости от типа водохранилища (рис. 4.7).

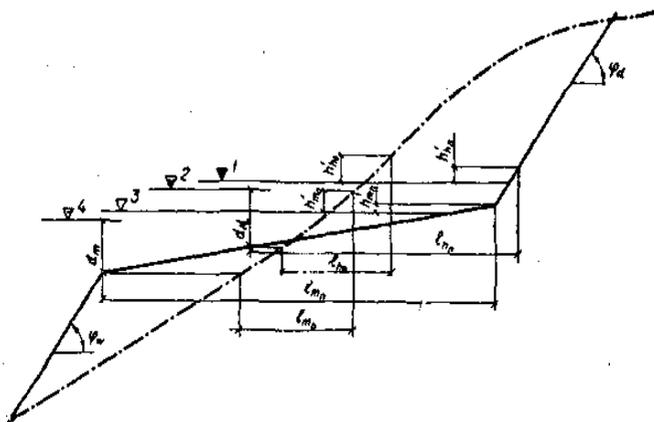


Рис. 4.7. Схема построения прогнозного (вспомогательного или искомого) профиля берегового склона:
 пунктирная линия – начальное положение берегового склона; сплошная линия – профиль склона на конец периода времени T ;
 1 – уровень воды для отсчета h'_h ; 2 – уровень воды для отсчета d_h ;
 3 – уровень воды для отсчета h'_m ; 4 – уровень воды для отсчета d_m

Первоначально на исходный (существующий) профиль берегового склона наносят заданное положение бровки будущего берега и вычерчивают профиль берега. Отметку основания берега (верхнего предела размыва ВПР) принимают равной отметке уровня воды той или иной обеспеченности, Затем с чертежа снимают величину объема размывной породы V (в кубометрах с 1 м берега). Для построения вспомогательного профиля береговой зоны подводной части определяют дополнительные показатели.

Объем аккумуляции наносов на внешнем краю отмели V_a (m^3) на 1 м берега, рассчитывают по формуле

$$V_a = \kappa_a V, \quad (4.8)$$

где V – величина объема размывной породы, m^3 .

Четвертый этап заключается в определении времени формирования вспомогательного профиля в годах T .

На водохранилищах в условиях стояния низких уровней типа при расчете T следует пользоваться формулой:

$$T = \frac{V \cdot \gamma \cdot \kappa_d \cdot l_m^2}{N_d \cdot \kappa_b \cdot l}, \quad (4.9)$$

где γ – удельный вес пород с учетом взвешивающего влияния воды, H/m^3 ;

m – средняя ширина прибрежной отмели за период формирования вспомогательного профиля, m ;

κ_d – коэффициент размываемости пород;

N – суммарное значение удельной энергии волн, подходящих к прибрежной отмели при высоких уровнях;

κ_a – коэффициент аккумуляции наносов;

V – объем размывной породы (в m^3 с 1 м берега);

L – эмпирическая постоянная, равная 0,06.

Время формирования профиля берега в условиях стояния высоких и средних уровней воды можно рассчитывать по формуле:

$$T = \frac{V \cdot \gamma \cdot k_d}{k_b \cdot l(N_h / l_h^2 + N_m / l_m^2)}, \quad (4.10)$$

где N_h и N_m – нормальные составляющие удельной энергии волн, подходящих к прибрежной отмели, соответственно при высоких и средних уровнях, Дж/год;

l_h и l_m – средняя за период T ширина прибрежной отмели и при высоких и средних – низких уровнях; остальные обозначения те же, что и в формуле (4.9).

Удельный вес пород с учетом взвешивающего влияния воды γ_b вычисляют по формуле:

$$\gamma = (\gamma_b - 9810) \frac{\gamma_v}{\gamma_b}, \quad (4.11)$$

где γ_b и γ_v – удельный вес частиц породы и сухой породы определяют по данным непосредственных измерений или по нормативным данным с учетом геолого-литологического строения берегового склона.

При наличии фактических данных о размыве берега, аналогичного по своему геолого-литологическому строению берегу, для которого осуществляется прогноз, можно получить более точные осредненные значения коэффициента k_b путем обратных расчетов по формулам (4.9) и (4.10).

Среднюю ширину прибрежной отмели l_m , сформировавшейся за период времени T , можно найти из выражения:

$$l_m = 0,5 \cdot (l_{Mo} + l_{Mn}), \quad (4.12)$$

где l_{Mo} – первоначальная ширина отмели, снимаемая с исходного профиля берегового склона, м;

l_{Mn} – ширина отмели, снимаемая со вспомогательного профиля, м. (рис. 4.7)

Таким же способом рассчитывается l_h .

Пятый и *шестой этапы* сходны с третьим и четвертым. На пятом этапе производят таким же способом, как и на третьем, построение второго промежуточного профиля берегового склона соответствующему новому заданному положению бровки берега, а на шестом – расчет времени, необходимого для его формирования.

Если время формирования первого промежуточного профиля получилось меньше заданного срока прогноза, второй профиль размещают на чертеже дальше от исходного профиля с таким расчетом, чтобы искомый прогнозный профиль оказался между вспомогательными профилями. Если же время формирования первого вспомогательного профиля больше срока прогноза, то второй вспомогательный профиль размещают ближе к исходному профилю берега.

На *седьмом этапе*, имея для каждого промежуточного профиля следующие данные: рассчитанное время его формирования T , снятый с чертежа объем размытой породы V и заданную величину отступления бровки берега S строят графики вида: $V=f(T)$ и $S=f(T)$.

Завершающий *восьмой этап* состоит в том, что определяются величины V_n и S_n на заданный срок прогноза и строится искомый прогнозный профиль берегового склона, соответствующий величинам V_n и S_n , используя те же приемы, что и при построении промежуточных вспомогательных профилей. При долгосрочном прогнозе (более 10 лет) особенно в начале эксплуатации водохранилища при неоднородных геолого-геоморфологических условиях побережья рекомендуется выполнять прогнозные расчеты по нескольким поперечникам в пределах участка протяженностью не менее одного километра.

***Прогноз переработки берегов малых водохранилищ
(метод В. Е. Левкевича, БНТУ, г. Минск)***

Метод прогноза [3–5] разработан и основан на использовании статистических моделей, полученных в результате обобщения и анализа многолетних данных стационарных натуральных наблюдений на ряде водохранилищ Беларуси.

Метод прогноза может использоваться как для проектируемых водохранилищ, так и для эксплуатируемых, но имеющих ограниченный срок эксплуатации: для водохранилищ группы 1 до 5 лет, группы 2 до 3 лет. Приняты следующие основные обозначения и классификация профилей абразионного берега, а соответственно и расчетные схемы:

а) профиль берега, имеющий абразионный уступ или террасу (рис. 4.8 а);

б) профиль берега уположенной, пологой формы (рис. 4.8 б).

Выделяются следующие элементы профиля абразионного берега (рис. 4.8 а, б): береговой уступ (а), береговая отмель (б), абразионная часть береговой отмели (в), пляж (г), аккумулятивная часть береговой отмели (д), внешний склон береговой отмели (е), внешний край береговой отмели (ж), шлейф из прибрежных осадков (з).

В прогнозных расчетах используются следующие обозначения:

НПУ – нормальный подпорный уровень, м;

ВБ – верхний бьеф водохранилища;

$\Delta H_{\text{ол}}$ – амплитуда колебания уровня водохранилища в безледный период, м;

D – длина разгона волн, м;

$H_{1\%}$ – высота волны 1% обеспеченности в группе волн.

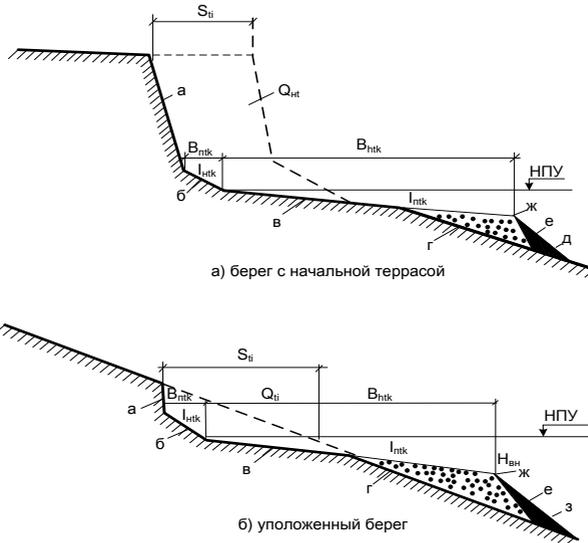


Рис. 4.8. Схема и элементы профиля переработки

Характеристики профиля переработки, определяемые при прогнозе:

S_{tk} , S_{ti} – линейная переработка берега, m на конечный срок t_k и за t_i лет;

Q_{tk} , Q_{ti} – объем переработки берега, $m^3/пм$ на конечный срок t_k и за t_i лет;

Bh_{tk} , Bh_{ti} – ширина надводной части отмели, m на конечный срок t_k и за t_i лет;

$I_{n_{tk}}$, $I_{n_{ti}}$ – уклон надводной части отмели на конечный срок t_k , и за t_i лет;

Bn_{tk} , Bn_{ti} – ширина подводной части отмели, m на конечный срок t_k , и за t_i лет;

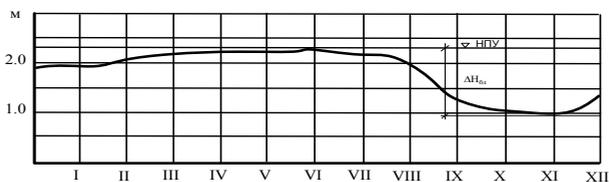
$I_{п_{tk}}$, $I_{п_{ti}}$ – уклон подводной части отмели на конечный срок t_k и за t_i лет;

$H_{вн}$ – глубина на внешнем крае отмели, m .

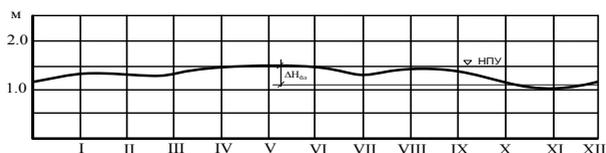
Принято, что все водохранилища Беларуси в зависимости от уровня режима в верхнем бьефе (ВБ) делятся на две группы:

а) первая – водоемы с амплитудой колебания уровня в безледный период более 0,5 м и малой обеспеченностью отметок ВБ близких к отметкам НПУ (водоемы многолетнего и сезонного регулирования) (рис. 4.9 а);

б) вторая – водоемы с малыми колебаниями уровней в безледный период (0,1–0,5 м), но большой обеспеченности отметок близких к НПУ (водоемы сезонного, суточного недельно-суточного регулирования, а также наливные) (рис. 4.9 б).



а) водохранилища группы 1



б) водохранилища группы 2

Рис. 4.9. Уровненный режим малых водохранилищ

В зависимости от группы водохранилища профиль береговой отмели может иметь следующие характеристики, определяемые прогнозом:

а) для условий водохранилища первой группы – надводную часть, характеризуемую шириной $B_{нi}$ и уклоном $I_{нi}$ и подводную, имеющую соответственно $B_{пi}$ и $I_{пi}$, а также глубину на внешнем крае отмели – $H_{вн}$.

б) профиль отмели водохранилища второй группы - имеет все элементы аналогичные отмеченным за исключением надводной части отмели, отсутствующей у данной группы водоемов.

В зависимости от задач, решаемых конкретно по рассматриваемому объекту возможно выполнение прогноза на различный срок эксплуатации водоема, а также расчет параметров профиля:

- при назначении водоохранных зон водохранилища практический интерес представляет прогноз на конечный срок формирования склона и характеристика линейной переработки берега;

- при размещении водозаборов выполняется полный прогноз с динамикой во времени и расчетом всех характеристик профиля, с дальнейшим определением направления движения потоков наносов;

- разработка мероприятий по инженерной защите берегов требует полного прогноза деформации берегового склона с обязательным расчетом параметров подводной части профиля;

В зависимости от конфигурации береговой линии в плане назначаются расчетные створы, для которых выполняется прогноз: при относительно простой береговой линии (достаточно 3–5 поперечников в начале и конце участка, а также посередине), при наличии мысов и бухт назначается большее количество створов.

Количество створов регламентируется также целью, поставленной перед прогнозом:

- при назначении водоохранных зон, достаточно 3–5 створов;

- при размещении оголовков водозаборов для водоснабжения, мелиорации и т.д., а также назначения берегозащитных мероприятий, необходимо более детальное прогнозирование с наличием большого числа расчетных створов.

В соответствующем масштабе по длине участка наносятся по нормали к урезу через 25÷100 м поперечники, по которым выполняется прогноз.

Использование данных предварительного анализа для проведения фоновых прогнозов, служат исходной (входной) информацией для выполнения прогноза, как с применением ручного счета, так и комплекса прикладных программ входящих в данную методику.

Детальный прогноз, при котором определяются все элементы профиля на заданный срок, выполняется в следующей последовательности:

а) установив, предполагаемый участок переработки и наметив расчетные поперечники, производят подготовку исходной информации;

б) определяют и выбирают по группе водохранилища, а также форме берегового склона расчетную модель и соответствующие алгоритм и программу (при значительном объеме вычислений);

в) на заданный период времени (в соответствии с целями прогноза) выполняется прогноз.

По результатам прогноза производится, общая оценка устойчивости береговой линии, назначаются мероприятия по берегозащите, переносу строений из зоны обрушения, обосновывается ширина водоохраных зон, расположение водозаборов и т.д.

Процесс переработки берегов в условиях малых водохранилищ – многофакторный процесс. Поэтому при построении моделей, описывающих форму профиля разрушаемого берега на различный период времени, всесторонне учитывалось влияние факторов определяющих и вызывающих процесс, а также условий, способствующих переработке. К берегообразующим факторам относятся: ветровое волнение и уровенный режим; морфометрия водоема, морфология берега, параметры гранулометрического состава грунта.

Это означает, что любая характеристика профиля переработки S_b , Q_t и т.д., обозначенная через Y , описывается зависимостью:

$$Y_t = F_l(x_1, x_2, x_3, \dots, x_8), \quad (4.13)$$

где x_1 – характеристика волнения – высота волны 1% обеспеченности ($h_{1\%}$), м;

x_2 – амплитуда колебания уровня в безледный период ($H_{\text{бл}}$), м;

x_3 – длина разгона волны (D), м;

x_4 – распределение глубин по разгону волны (h_D), м;

x_5 – высота берега имеющего террасу (H_6), м;

x_6 – уклон берегового склона (I_6), м;

x_7 – средний диаметр частиц относительно однородного грунта (d_{50}), м;

x_8 – коэффициент неоднородности грунта (U);

Во времени развитие любого элемента профиля описывается зависимостью:

$$Y_{ii} = F_0(t_i)^b, \quad (4.14)$$

Выражение вида (4.14) является кинематической моделью. Кинематическая модель имеет две модификации, первая – для пологого склона, это выражение вида (4.14) и для берега с начальной террасой:

$$Y_{ii} = Y_n + Y_o(t_i)^b, \quad (4.15)$$

где Y_o – значение параметра в первый год эксплуатации;

Y_n – начальное значение элемента профиля.

В связи с тем, что модели (4.14) и (4.15) дают лишь качественное изменение элементов профиля во времени, то более обоснованным является использование моделей вида:

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3, \quad (4.16)$$

где X_1, X_2, X_3 – агрегированные безразмерные берегообразующие комплексы:

$X_1 = D/h_0$ – морфометрическая характеристика водоема в расчетном створе;

$X_2 = h_0/\Delta H_{\delta n}$ – характеристика гидрологического режима водохранилища;

$X_3 = H_{\delta}/d_{50}$ – геоморфологическая характеристика берегового склона, для берега, имеющего береговой обрыв (террасу);

$X_{\delta} = I_{\delta}/u$ – геоморфологическая характеристика для пологого берегового склона.

Численные значения коэффициентов A_0, A_1, A_2, A_3 приводятся в табл. 4.2. Для берегов, сложенных относительно однородными грунтами, но имеющими различную исходную форму модель процесса на конечную стадию имеет следующий вид. Так для берега пологой формы:

$$Y_{ik} = A_0 + A_1 \left(\frac{D}{h_D} \right) + A_2 \left(\frac{h_{1\%}}{\Delta H_{\delta n}} \right) + A_3 \left(\frac{I_{\delta}}{U} \right), \quad (4.17)$$

Для берега с начальной террасой выражение (4.17) имеет ту же структуру, но последний член представлен комплексом вида H_{δ}/d_{50} .

Таблица 4.2

Структура математических моделей для прогноза переработки берега

Группа водохранилищ	Элемент профиля	Коэффициенты			
		A_0	A_1	A_2	A_3
Группа 1	S_t	-62,38	0,01	71,26	0,009
		-62,38	0,01	71,26	0,009
		-66,24	0,02	95,44	0,002
		-66,24	0,02	95,44	0,002
		-68,35	0,02	96,30	0,002
		-68,35	0,02	96,30	0,002
		-72,06	0,02	97,70	0,002
		-72,06	0,02	97,70	0,002
		-74,07	0,02	97,71	0,002
		-74*07	0,02	97,71	0,002
		-74,07	0,02	97,71	0,002

Продолжение таблицы 4.2

Группа I	Q_{t_i}	-38,90	0,06	5,06	0,002
		-38,51	0,05	6,53	0,003
		-39,92	0,04	6,59	0,003
		-40,06	0,06	7,11	0,004
		-41,48	0,06	10,05	0,005
		-41,48	0,06	10,05	0,005
		-42,10	0,06	22,90	0,007
		-42,10	0,06	22,90	0,007
		-45,86	0,06	37,60	0,007
		-45,86	0,06	37,60	0,007
		-45,06	0,06	38,10	0,007
		-45,06	0,06	38,10	0,007
		-46,08	0,06	39,44	0,006
		-46,08	0,06	39,44	0,006
		-46,08	0,06	39,44	0,006

Расчёт элементов профиля с интерполяцией результатов на различный период эксплуатации водоёма t_i производится по моделям вида:

для берега с начальной террасой

$$Y_{t_i} = \frac{1}{t_i^b} \left[A_0 + A_1 \left(\frac{D}{h_D} \right) + A_2 \left(\frac{h_{1\%}}{\Delta H_{\text{бл}}} \right) + A_3 \left(\frac{H_6}{d_{50}} \right) \right], \quad (4.18)$$

для пологого склона

$$Y_{t_i} = \frac{1}{t_i^b} \left[A_0 + A_1 \left(\frac{D}{h_D} \right) + A_2 \left(\frac{h_{1\%}}{\Delta H_{\text{бл}}} \right) + A_3 \left(\frac{I_6}{U} \right) \right], \quad (4.19)$$

Значения показателя «b» приводятся ниже в табл. 4.3.

Таблица 4.3

**Значения показателя «*b*» для расчётов профиля
переработки**

Группа водохранилища	Форма профиля	Элемент профиля	<i>b</i>
Водохранилище группы I	с террасой	S	0,219
		Q	0,245
		B_n	0,347
		I_n	0,406
	Пологий склон	S	0,301
		Q	0,785
		B_n	0,643
		I_n	0,576
Водохранилище группы II	с террасой	S	0,399
		Q	0,785
		B_n	0,783
		I_n	0,419
	пологий склон	S	0,565
		Q	0,433
		B_n	0,560
		I_n	0,416

Практический интерес для проектировщиков и службы эксплуатации представляют сроки и размеры окончательной переработки склона.

Приняв, что формирование профиля переработки происходит в условиях Беларуси в безледный период при отметках верхнего бьефа (ВБ) равных или близких к отметкам НПУ, имеем следующее соотношение

$$t_{\text{квдх 1гр}} = (11 \div 15), \text{ лет} \quad (4.20)$$

$$t_{\text{квдх 2гр}} = (6 \div 10), \text{ лет} \quad (4.21)$$

В прогнозах принято, что конечным сроком следует считать для водохранилищ группы I: $t_k = 15$ лет, группы II $t_k = 10$ лет.

Срок формирования профиля равновесия (окончания переработки) зависит от амплитуды колебания уровня в ВБ и принимается по графику (рис. 4.10).

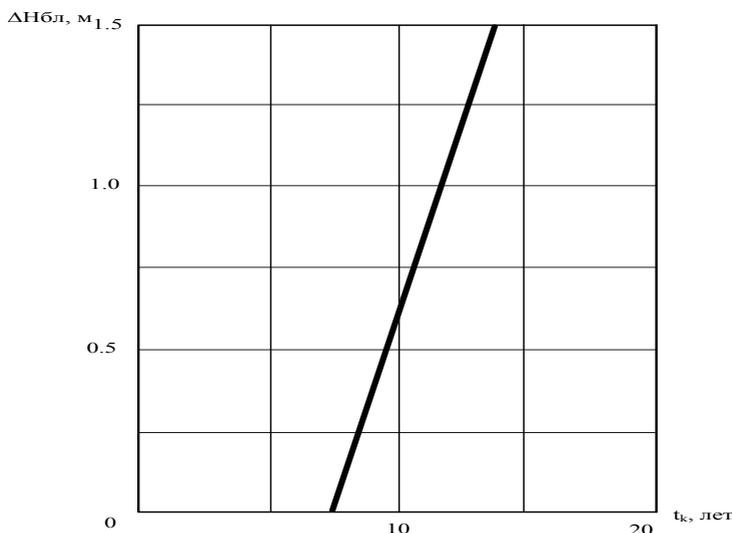


Рис. 4.10. Определение срока окончания переработки

В связи с тем, что переработка берега сложенного грунтами с повышенной неоднородностью $u \geq 3,5$ происходит в более короткие сроки ($t_k = 8$ лет для водохранилищ группы I и $t_k = 4$ года для водохранилищ группы 2), практический интерес представляет только лишь период конечной переработки. Прогнозные расчеты для грунтов с повышенной неоднородностью производятся с помощью поправочных коэффициентов (рис. 4.11). Граничные условия для применения прогнозных моделей приведены ниже в табл. 4.4.

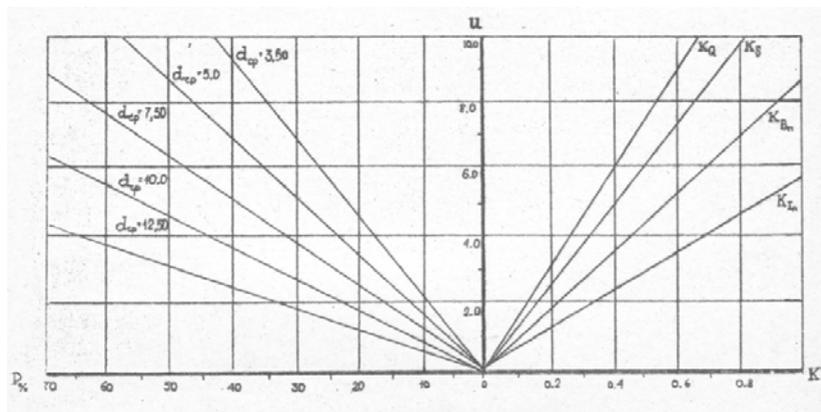


Рис. 4.11. Диаграмма для определения поправочных коэффициентов, учитывающих повышенную неоднородность грунта

Таблица 4.4

Граничные условия применения метода прогноза переработки берегов водохранилищ

Группа водохранилищ	Берегообразующие факторы и пределы варьирования их характеристик							
	Длина разгона волны (D), м	Средняя глубина водоема (h_D), м	Высота волны 1% обеспеченности ($h_{9\%}$), м	Амплитуда колебания уровней в безл. период ($\Delta H_{\text{бл}}$), м	Уклон берегового склона ($I_{\text{б}}$)	Коэффициент неоднородности грунта (η)	Высота береговой террасы ($H_{\text{б}}$), м	Средний диаметр частиц грунта (d_{50}), м
Гр. I	1000÷5000	2÷4	0,2÷1,2	0,6÷3,5	0,01÷0,3	1,5÷10,0	1,5÷9,0	0,0005÷0,035
Гр. II	1000÷3500	2÷4	0,2÷0,5	0,1÷0,5	0,01÷0,3	1,5÷10	1,5÷12	0,0005÷0,035

Методы прогноза переработки берегов, основанные на использовании принципов аналогий и масштабных серий

В практике прогнозирования развития абразионных берегов известны и применяется несколько методов аналогий. К первой группе аналогий относятся предложения Б. А. Полякова,

Е. К. Гречищева и др. Прогноз по методикам указанных авторов выполняется на 10-летний период эксплуатации водохранилища. Вторую группу методов аналогий представляет метод Г. С. Золотарева, существенным отличием которого является использование системы инженерно-геологических критериев подобия склонов водохранилищ, позволяющая получить детальную картину их строения. Глубина волнового воздействия определяется в зависимости от характера слагающих отмель пород. За показатель энергии волнения принимается высота волны 20 %-ной обеспеченности. В расчетах не предусмотрен учет продолжительности безледоставного периода, который существенно отличается в различных климатических зонах.

К третьей группе методов аналогии относятся методы Ф. П. Саваренского, В. Л. Булаха, Л. Б. Розовского. Эти методы требуют натурных режимных наблюдений на эксплуатируемых водохранилищах и фактически являются переходными к методам прогноза процесса переформирования берегов проектируемых водохранилищ. Прогнозируемые берега водохранилища должны отвечать своему аналогу по конфигурации берега в плане и в профиле, по составу грунтов, по заложению откосов, по уровенному и волновому режимам. Путем сравнения геоморфологического и геологического строения берегов предлагают выбирать модель-аналог А. Д. Колбутов и Д. П. Финаров .

Методом аналогии в сравнении с динамикой морских берегов пользовался Б. А. Пышкин [1] для оценки процесса переформирования берегов водохранилищ. Наиболее полно разработанным методом в этой группе является метод Л. Б. Розовского. Прогноз выполняется им путем интерпретации данных с натурной модели на объект прогноза. Выбор аналога производится по качественным оценкам и количественным критериям подобия. Имеется пять критериев геологического подобия (КГП): гидродинамического подобия, литологического подобия, подобия аккумулятивных процессов, геометрического подобия профилей склонов, геометрического подобия формы береговой линии в плане. Количественные критерии подобия представляют собой

безразмерные величины, отражающие взаимодействие берегоформирующих факторов и условий. Так, универсальные критерии геодинамического подобия, предложенные Л. Б. Розовским, имеют следующий вид:

$$k_x = H\gamma/C, \quad (4.22)$$

$$k_2 = a\gamma/C, \quad (4.23)$$

$$k_3 = h\gamma/C, \quad (4.24)$$

где γ – плотность грунта;

C – сцепление;

H – высота склона, м;

a — угол наклона;

h — мощность покровных образований, м.

Кроме того, каждое отклонение фактических условий от расчетных схем, учитывается посредством индексов (критериев-симплексов). На картах натуральных моделей величины переработки даются в виде кривых обеспеченности, которые позволяют выбрать величины размыва в зависимости от экологической ценности участка.

Метод прогноза переработки берегов по инженерно-геологическим и гидрологическим аналогиям впоследствии был доработан И. Н. Крыжановской, которая предлагает новый «вероятностно-статистический» подход в прогнозах переработки берегов водохранилищ. На смену альбомам-аналогам создаются информационно-поисковые системы «Берега водохранилищ», содержащие основные качественные и количественные характеристики отдельных береговых склонов.

В приложении к условиям водохранилищ Беларуси были сформулированы основные принципы и положения метода натурального гидроморфологического подобия, которые могут использоваться при прогнозе абразионных процессов [3–7]. Метод дополняет и развивает известные положения при соблюдении следующих требований:

– метод может быть применен лишь к водным объектам одной

группы (например, аналог и прогнозируемый объект должны принадлежать одной группе водоемов по режиму колебания уровня в верхнем бьефе;

– метод может быть применен (в случае выполнения вышеотмеченного пункта) для близких по форме (аналога и прогнозируемого объекта) береговых склонов;

– достижение подобия аналога и прогнозируемого объекта достигается путем выполнения морфометрических, гидрологических и геоморфологических условий подобия.

Кроме указанных условий подобия, следует соблюдать подобие процесса с учетом фактора времени, а также стадийности. В общем виде условия подобия, предложенные в [3, 4] имеют следующий вид:

- морфометрические

$$\left. \begin{aligned} M_{ky} &= L/B_{cp} \\ M_{Kz} &= H_{cp} \cdot 10^{-3} / B_{cp} \\ M_H &= D/h_D \end{aligned} \right\} idem, \quad (4.25)$$

- гидрологические

$$\left. \begin{aligned} M_{K\Delta} &= A_{\delta l} / H_{cp} \\ M_{KA} &= h_{1\%} / \Delta H_{\delta l} \\ M_{knp} &= W_{cp,млл} / v_n \end{aligned} \right\} idem,, \quad (4.26)$$

- геоморфологические

$$\left. \begin{aligned} M_{Kuz} &= L_1 / L_2 \\ M_{kd} &= H_{\delta} / d_{50} \\ M_{k\eta} &= I_{\delta} / \eta \end{aligned} \right\} idem, \quad (4.27)$$

где в (4.25–4.27) приняты следующие обозначения:

L – длина водохранилища, м;

B_{cp} – средняя ширина водохранилища, м;

H_{cp} – средняя глубина водохранилища, м;

D – расчетная длина разгона волны, м;

h_D – средняя глубина водохранилища по длине разгона, м;

$\Delta H_{\delta l}$ – амплитуда колебания уровней в водохранилище в безледоставный период, м;

$h_{1\%}$ – высота волны 1%-ной обеспеченности в системе, м;
 $W_{\text{ср.мгд}}$ – среднегодовой объем стока водотока в створе гидроузла, млн м³;
 Vn – полный объем водохранилища, млн м³;
 L_1 – длина спрямленной береговой линии, м;
 L_2 – длина реальной береговой линии, м;
 H_6 – высота берега, м;
 d_{50} – средний диаметр части размываемого грунта, м;
 I_6 – уклон берега;
 η – коэффициент неоднородности размываемого грунта.

Соблюдение требования подобия критериев (4.25–4.27) для достаточно точного и обоснованного подбора аналога при прогнозировании деформации коренных берегов, равно как откосов дамб и плотин на наливных водохранилищах, не всегда может быть выполнено. Поэтому для стадии проектирования достаточным в первом приближении является соблюдение следующих критериев подобия:

$$\left. \begin{aligned} M_H &= D/h_D \\ M_{кА} &= h_{1\%} / \Delta H_{6л} \\ M_{кд} &= H_6 / d_{50} \end{aligned} \right\} idem, \quad (4.28)$$

При сравнении аналога с заданными условиями необходимо, чтобы значения показателей при полном совпадении критериев были близки между собой. Следует отметить, что аналогия процессов, происходящих в условиях моделей-аналогов и рассматриваемого объекта, может быть достигнута только лишь при соблюдении подобия всех критериев на различных уровнях, а именно: водохранилище – участок – створ. При этом полная аналогия может быть достигнута путем обеспечения следующих условий:

- подобия водохранилищ путем идентификации морфометрических и гидрологических критериев;
- подобия участков берега, склонных к развитию абразионных явлений, путем подбора морфометрических (4.25), гидрологических (4.26) и геоморфологических (4.27) критериев.
- подобия расчетных створов путем выполнения критериев (4.28) с учетом времени и стадийности процесса.

Необходимо отметить, что разработанный метод прогнозирования абразионных процессов с помощью натуральных аналогов может быть применен для различных типов водохранилищ. В отличие от крупных водохранилищ страны, на малых водных объектах к которым относится большинство водохранилищ Беларуси при определенных условиях, можно выполнять прогноз только по подобию геоморфологических и гидрологических признаков. Это подтверждает идентичность масштабов процессов абразии, имеющих место на естественных озерных объектах и водохранилищах, созданных на базе озер. Наряду с вариантом переноса результатов прогноза с естественных объектов на водохранилища возможен и обратный путь – перенос с существующего озера-водохранилища результатов расчетов на строящийся объект. Ниже в табл. 4.5 приводятся возможные варианты применения метода натуральных аналогов к водохранилищам Беларуси, предложенные автором и к.т.н. В. В. Кобяком [6].

Таблица 4.5

Варианты применения метода натуральных аналогов

Объект-аналог	Объект прогноза	Идентификатор варианта
Естественное озеро	Естественное озеро	o_z-o_z
Естественное озеро	Озерное водохранилище	$o_z-o_{ш}$
Озерное водохранилище	Естественное озеро	o_m-o_z
Озерное водохранилище	Озерное водохранилище	o_w-o_w
Озерное водохранилище	Водохранилище руслового типа, озеровидное в плане	o_w-w_r
Водохранилище руслово озеровидное в плане	Озерное водохранилище	w_r-o_w
Озерное водохранилище	Наливное водохранилище	o_w-w_n
Наливное водохранилище	Озерное водохранилище	$K-o_w$
Водохранилище руслово озеровидное в плане	Наливное водохранилище	w_r-w_n
Наливное водохранилище	Водохранилище руслово озеровидное в плане	w_n-w_r

Прогноз деформаций берегов методом гидроморфологиче-

ского подобия выполняется в два этапа: I-ый этап – определение на проектируемом объекте (в случае наличия аналога) откосов, которые могут подвергнуться размыву; II-ой этап – выполнение прогноза размыва по контрольным створам.

Выбор аналогов для составления прогноза деформаций и предполагаемого размыва откосов с последующим выбором устойчивого профиля производится при выполнении условий подобия, определяемых (4.25–4.27). Численные значения критериев подобия для водохранилища – аналога с соответствующими сооружениями и проектируемого водного объекта – должны быть одинаковыми, (расхождение не более 20%), что обеспечит наибольшую достоверность прогноза. Значение критериев подобия приведены в табл. 4.6. Дальнейшее развитие метода природных аналогов для условий водохранилищ разработанного ранее, было в работах [4–7].

Таблица 4.6

Численные значения критериев подобия

Морфометрические (M_k)	Гидрологические (M_{kA})	Геоморфологические (M_d)
1.38 ÷ 24.0	0.18 ÷ 0.60	1630.0 ÷ 167.0

Наряду с методом аналогий, приведенным выше для оценки масштабов и объемов переработки может быть использован так называемый метод «масштабных серий». Данный метод известен достаточно давно и используется в русловой гидравлике. В применении к условиям береговых процессов на водохранилищах упоминание об его использовании в литературе практически отсутствует. Об этом методе очень скупо упоминалось лишь в работе В. Л. Максимчука [7] в которой оговаривались возможности его применения в условиях крупных равнинных водохранилищ. Но широкого распространения судя по анализу литературных источников он так и не получил. В этой связи, автор попытался использовать методические подходы, используемые в предложениях В.Л. Максимчука для условий водохранилищ Беларуси. Как

в последствии оказалось, сложность его применения заключается в том, что необходимо иметь водные объекты близкие по морфометрическим показателям и форме (контуру) близкой друг другу, а линейным размерам – масштабу различным. Соответственно различные будут и масштабы развития процесса переработки. Это сложное условие для крупных равнинных водохранилищ соблюсти практически невозможно, а вот для условий небольших водохранилищ, каковыми являются водные объекты Беларуси, оказалось возможным. По сути, метод «масштабных серий» является одной из разновидностей метода натурального подобия, т.е. аналогий. Поэтому, используя универсальный критерий подобия вида (4.28) в процессе выполнения процедуры прогноза подбираются аналоги различного масштаба, для водохранилищ с различным периодом эксплуатации и развития береговых процессов. Имея планы таких объектов – производится анализ контуров водоемов и прогнозирование процесса переработки с определением участков деформаций берегов, а затем путем обычной интерполяции определение характеристик участков разрушений, с перенесением результата на проектируемое водохранилище. Ниже на рис. 4.13 приведен пример подбора водохранилищ, образующих масштабную серию.



Солигорское водохранилище



Водохранилище Тетеринское

Рис. 4.13. Пример структурирования объектов для прогнозирования береговых процессов методом «масштабных серий»

Глава 5

РАСЧЕТ ЗАЛОЖЕНИЙ ГРУНТОВЫХ НЕЗАКРЕПЛЕННЫХ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ДАМБ И ПЛОТИНС УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

5.1. Определение заложения верховых грунтовых откосов

По форме поперечного сечения низконапорные плотины и дамбы подразделяются на следующие типы (рис. 5.1) [1, 2]:

- нормального профиля;
- уширенного профиля (с уположенным верховым откосом);
- распластанного профиля (с пологим волноустойчивым откосом);
- комбинированного профиля (сочетание нормального и распластанного профиля).

В перечисленных типах плотин гребень и низовой откос имеют одинаковую конструкцию, различия имеются в очертании и возможном креплении верхового откоса.

В плотинах нормального профиля (рис. 5.1 *а*) коэффициент верхового откоса зависит от высоты плотины, грунтов тела плотины и основания, а также способа ее возведения. Определяется из условия его общей устойчивости и находится обычно в пределах $m_1 \leq 3,5$. В плотинах нормального профиля не допускаются местные деформации верховых откосов под действием волн, поэтому они укрепляются капитальными креплениями из бетона, железобетона, камня и т.д. Применяются при любых высотах плотин и высотах волн. Надежность работы плотины в этом случае обеспечивается подбором соответствующих креплений, противофильтрационных и дренажных устройств.

В плотинах уширенного профиля (рис. 5.1 *б*) верховой откос более пологий и устраивается с коэффициентом откоса $10 < m_1 > 3,5$, при высоте волны 1% - ой обеспеченности до 1,0 м. В них допускается возможность размыва откоса, в связи с чем, верховой откос укрепляется облегченным креплением или на

нем устраиваются средства активной защиты (простейшие волноломы, посадки кустарника и др.).

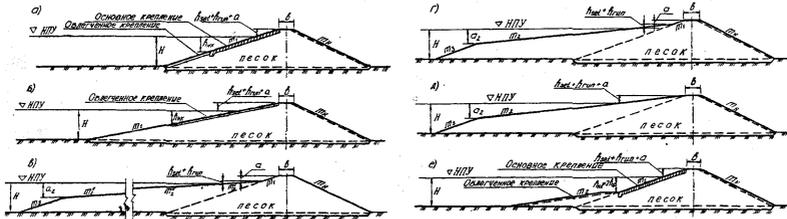


Рис. 5.1. Типы профилей низконапорных плотин и дамб [1,2]:
 а – нормальный; б – уширенный; в – распластанный (тип 1);
 г, д – распластанный (типы 2 и 3); е – комбинированный

В плотинах, дамбах распластannого профиля (рис. 5.1 в, г, д) верховой откос устраивается с заложением, близким к заложению откоса профиля динамического равновесия для принятых грунтов тела плотины, расчетных характеристик уровня и волнового режимов. Коэффициент откоса обычно $m_1 > 10$ и его величина определяется специальными расчетами.

На верховых откосах плотин этого типа допускается возможность небольших размывов, которые обычно не представляют опасности для эксплуатации сооружений, но их следует учитывать при выборе типа крепления.

В плотинах и дамбах с комбинированным верховым откосом (рис. 5.1 е) верхняя часть его до глубины $H = h_{1\%}$ имеет заложение, соответствующее нормальному профилю, нижняя – соответствующее заложению откоса плотины с уположенным или волноустойчивым откосом. Поверхность откоса в верхней части крепится капитальным креплением (чаще всего железобетонным или каменным).

Плотины всех типов могут устраиваться из песчаных и глинистых грунтов, свойства которых отвечают требованиям, предъявляемым к грунтам, применяющимся для строительства напорных земляных гидросооружений.

Плотины могут выполняться однородными или из грунтов с различными физико-механическими свойствами (особенно плотины распластанного профиля), однако предпочтение следует отдавать однородным плотинам.

Верховой откос плотины нормального профиля (рис. 5.1 а) проектируется по общепринятым нормам и рекомендациям, изложенным в нормативной, технической литературе, ведомственных рекомендациях и типовых проектах.

В плотинах и дамбах уширенного профиля верховой откос проектируется более пологим, чем в плотинах нормального профиля, и более крутым, чем в плотинах распластанного профиля. Коэффициент откоса находится в пределах $5 \leq m_1 \leq 10$, при этом он увеличивается с увеличением высоты волны и уменьшением среднего диаметра частиц грунта, слагающего откос. Его величина на 20-25% меньше величины волноустойчивого откоса и может быть определена по табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Рекомендуемые коэффициенты верховых откосов плотин
уширенного профиля**

Высота плотины ($H_{пл}$), м	Средняя глубина водоема перед откосом (H), м	Коэффициент верхового откоса (m_1)	Максимальная высота волны (h_b), м
5...8	4...6	5...8	0,5...0,8
8.10	7...9	0,8...1,0	8...10

При значительной протяженности плотины или дамбы рекомендуется применять коэффициент откоса различным на отдельных участках, в зависимости от ее высоты и высоты волны.

Так, на участках, где глубина воды не превышает 1,0 м, считая от НПУ, а высота волны, воздействующей на откос 0,3 м, коэффициент откоса следует принимать $m_1 = 5 - 6$.

Переход от одного коэффициента заложения откоса к другому по длине плотины или дамбы осуществляется по зависимости вида:

$$L_{пл} = H_{пл} \cdot m_1, \quad (5.1)$$

где $H_{пл}$ – средняя высота плотины, м;

m_1 – заложение верхового откоса

Так как на верховых откосах допускается возможность возникновения их деформаций в виде размыва их следует укреплять легкими креплениями в виде: гравийной отсыпки, тюфяков из использованных автопокрышек, георешеток и т.д.. Является возможным также применение средств активной защиты. К ним относятся простейшие подводные волноломы (волногасящие стенки) и плавучие волноломы (запаны). Для определения необходимости крепления и выбора его типа необходимо, рассчитать возможную переработку (деформацию) откоса и ее интенсивность в течение первых лет эксплуатации и затем подбирать тип крепления, исходя из местных условий и технико-экономической целесообразности.

В случае, если на верховой откос досыпается слой грунта с повышенной неоднородностью, при расчетах локальных размывов необходимо учитывать возможность образования защитной самоотмостки из крупнофракционного материала (гальки, валунов) [2 – 5].

В плотинах и дамбах распластанного профиля верховой откос проектируется ломаного очертания. Выше зоны волнового воздействия профиль принимается более крутым, а в зоне активного воздействия размывающего действия волны – более пологим. При этом, в зависимости от местных условий, а именно: глубины перед плотиной, ее высоты, высоты волны, хозяйственного назначения, условий эксплуатации, он может быть трех типов.

Тип 1-й (рис. 5.1 в) – пологая часть отмели состоит из двух частей: верхней (более крутой) – в зоне наката волны, и нижней (более пологой) – от расчетного уровня до нижней границы размыва.

Тип 2-й (рис. 5.1 г) – пологая часть откоса от верхней до нижней границ размыва имеет одинаковый уклон.

Тип 3-й (рис. 5.1 д) – пологий откос начинается от гребня плотины и оканчивается на нижней границе размыва.

Тип 1-й наиболее универсальный и экономичный, однако, его экономичность особенно проявляется при создании сравнительно высоких плотин большой протяженности и при значительной высоте волны, т.е. при необходимости отсыпки больших объемов грунта для устройства плотины. Этот вариант может быть рекомендован для плотин высотой 8 – 10 м и выше, при высоте волны около 1 м, хотя не исключается возможность его применения и при меньших высотах плотины и волны.

Тип 2-й более простой и может быть принят для сравнительно невысоких плотин высотой 5 – 8 м и при относительно небольшой высоте волны (0,5–0,8 м), т.е. когда выполнение переходного участка с коэффициентом откоса m_1 связано со значительными трудностями или вообще невозможно (в связи с габаритами землеройных механизмов).

Тип 3-й может быть рекомендован для невысоких плотин или дамб высотой до 5,0 м при высоте волны до 0,5 м, только периодически удерживающих напор (например, дамбы рыбоводных прудов).

Характеристики профиля верхового откоса зависят от вида грунтов тела плотины, их физико-механических свойств, характеристик уровневого и волнового режимов и определяются соответствующими расчетами. Ниже рассмотрим некоторые из них, наиболее часто используемые в Беларуси при проектировании водохозяйственных объектов.

Расчет профиля верхового откоса из несвязных грунтов по методике В. Л. Максимчука

Методика [6] применяется для расчета профиля плотин первого типа, отсыпанных из мелкого и среднего песков, при значительных колебаниях уровня верхних бьефов.

По этой методике коэффициент откоса верхней части плотины от гребня до отметки, на которую накатывается волна при НПУ, с учетом ветрового нагона, принимается равным

$$m_1 = (1,2 \dots 1,5) m_0, \quad " \quad (5.2) "$$

где $m_0 = ctg\varphi$ – коэффициент естественного откоса грунта тела плотины;

φ – угол внутреннего трения несвязного грунта тела плотины. Ниже, от отметки наката волны до НПУ, коэффициент устойчивого откоса определяется по формуле:

$$m'_2 = m_0 + 0.17 \left(\frac{h_{1\%}}{d_{cp}} \sqrt[3]{\frac{\bar{\lambda}}{h_{1\%}}} \right), \quad (5.3)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1%-й обеспеченности, м;

λ – средняя длина волны, м;

d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц несвязного грунта, м.

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i \cdot P_i}{100} \quad (5.4)$$

где d_i – среднеарифметический диаметр фракции, м;

P_i – содержание этих фракций, %.

При отсутствии данных по гранулометрическому составу в качестве d_{cp} может быть принята величина d_{50} .

От отметки НПУ до нижнего предела размывающего действия волны коэффициент откоса определяется по формуле:

$$m_2'' = m_0 + 0.37 \left(\frac{h_{1\%}}{d_{cp}} \sqrt[3]{\frac{\bar{\lambda}}{h_{1\%}}} \right), \quad (5.5)$$

Глубина размывающего действия волны определяется по формуле:

$$a_2 = 0.028 \left(\frac{h_{1\%} \cdot \bar{\lambda}}{\sqrt{d_{cp}}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (5.6)$$

Ниже этой глубины коэффициент откоса m_3 принимается

$$m_3 = (1,2 \dots 1,5) m_0 \quad (5.7)$$

Коэффициент пологого откоса может быть уменьшен, если его поверхность покрыть слоем крупнозернистого песка или гравия толщиной более $0,1a_2$, но не менее 20,0 см.

В случае, если ось плотины и преобладающее направление ветра в безледный период года составляют острый угол, возможно перемещение наносов по откосу в продольном направлении, параллельно урезу, и в этом случае необходимо при необходимости запроектировать на поверхности пологой части откоса наносоудерживающие сооружения типа бун. Наличие наносоуправляющих сооружений на откосе не окажет влияния на величину расчетных коэффициентов заложения откоса.

Расчет профиля верхового откоса по методике Е. М. Левкевича и В. Н. Юхновца (метод БПИ)

Метод расчета [7] был разработан в 70-е годы XX века и применим для расчета верховых волноустойчивых откосов второго и третьего типов плотин и дамб, отсыпаемых из мелкого и среднего песка ($d_{50} = 0,10 \dots 0,50$ мм) при приведенных разгонах волны до 3,0 км и при небольших колебаниях уровня воды в верхнем бьефе.

Коэффициент откоса m_1 от гребня до верхнего предела размывающего действия волны (высоты наката) определяется по (5.2).

Коэффициент волноустойчивого откоса в зоне между верхним и нижним пределами размывающего действия волны определяется по формуле:

$$m_2 = 3.21 \left(\frac{L_{\text{пр}}}{d_{50}} \right)^{0.7}, \quad (5.8)$$

где d_{50} – средний диаметр частиц грунта, мм;

$L_{\text{пр}}$ – эквивалентный разгон волны, км, который определяется в зависимости от сложности береговой линии водоема. При простой конфигурации водохранилища в плане, когда $L_0/L_{\pm 2} < 2$, он принимается равным максимальному расстоянию от рассматриваемого створа сооружения до противоположного берега вне зависимости от направления сторон света. При сложной конфигурации береговой линии, когда $L_0/L_{\pm 2} < 2$, эквивалентная длина разгона определяется

$$L_p = 0,27[L_0 + 0.85(L_{+1} + L_{-1}) + 0.50(L_{+2} + L_{-2})], \quad (5.9)$$

где L_0 – длина разгона по главному лучу, равному максимальному расстоянию от рассматриваемого створа до противоположного берега, км;

$L_{\pm 1}$ и $L_{\pm 2}$ – длина разгона по лучам, проведенным соответственно под углом $22,5^\circ$ и 45° к главному лучу, км.

Верхний предел размывающего действия волны a_2 принимается равным высоте наката волны, определяемой по ТКП [8]. Нижний предел размывающего действия волны принимается равным глубине, на которой донные волновые скорости не превышают размывающих для грунта тела плотины, и определяется по выражению:

$$a_2 = \frac{\bar{\lambda}}{4\pi} \text{arcSh} \frac{\pi n^2 h_{1\%} g}{\lambda \omega^2_{\text{доп}}}, \quad (5.10)$$

где $\bar{\lambda}$ – длина расчетной волны, м;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;
 n – коэффициент, зависящий от пологости волны, находится по табл. 5.2;
 $v_{дон}$ – допускаемая не размывающая скорость, m/c .

Таблица 5.2

Значения коэффициента « n » в зависимости от пологости

волны $\bar{\lambda} / \bar{h}$

Пологость волны, $\bar{\lambda} / \bar{h}$	8	10	15	20	30
Коэффициент n	0,6	0,70	0,75	0,80	1,0

Если полученная глубина будет меньше $2h_{1\%}$, то ее следует принять равной этой величине, т.е. $a_2 = 2h_{1\%}$.

В плотинах и дамбах комбинированного профиля верховой откос проектируется ломаного очертания: в верхней части от гребня до глубины равной $h = 2h_{1\%} + 0,3$ м, а коэффициент откоса принимается таким же, как в плотинах нормального профиля. Ниже по профидю - коэффициент откоса рассчитывается для условий волноустойчивого откоса плотины распластанного профиля (с учетом сработки водоема и соответствующего ему волнового режима). В месте перехода от крутой части откоса к пологой устраивается берма шириной до 5 м.

Верхняя, крутая часть откоса, крепится капитальными креплениями по тем же рекомендациям, что и для плотин нормального профиля; нижняя (ниже бермы) –облегченными (отсыпка гравия или песчано-гравелистого грунта).

5.2. Расчёт деформаций незакреплённых верховых откосов земляных гидротехнических сооружений

Напорные сооружения на водохранилищах – земляные дамбы и плотины распластанного профиля с незакрепленными верховыми откосами делятся на следующие типы;

– с пологим верховым откосом прямолинейного профиля (рис. 5.2 а);

– с пологим откосом ломаного профиля (рис. 5.2 б);

Практика показала, что проектирование откосов сооружений рекомендуется выполнять в три основных этапа:

1-й этап – выбор, в соответствии с местными условиями расчетной схемы и расчетных зависимостей, а затем определение по ним величины заложения m_2 ;

2-й этап – расчет возможных деформаций, полученного в результате проектных работ по первому этапу, профиля откоса, имеющего m_2 ;

3-й этап – корректировка и принятие окончательного проектного заложения верхового откоса дамбы или плотины с поправкой на возможные деформации профиля откоса.

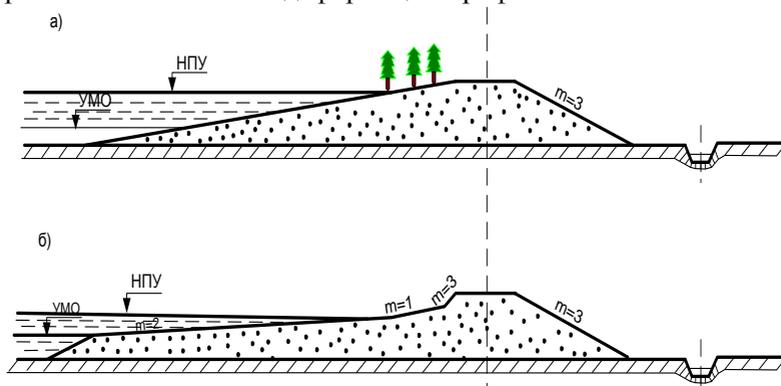


Рис. 5.2. Профиль грунтовой плотины (дамбы) распластанного профиля:
а – с прямолинейным профилем верхового откоса; б – с пологим верховым откосом ломанного профиля

Независимо от исходной методики определения заложения верховых откосов дамб и плотин, принимаемой в расчетах – верховой откос сооружений будет подвергаться деформациям – локальным размывам (переработке) в силу определенных погрешностей:

- в принятых расчетных схемах и зависимостях, недостаточно полно учитываются условия волнообразования и уровня режима в водоеме;
- в исходных данных и материалах изысканий, представляемых для прогноза, в которых не всегда достоверна информация о грунтовых условиях;
- в технологических отклонениях, возникающих в процессе строительства сооружений.

Расчёт деформаций профиля верхового откоса вероятностно-статистическим методом производится следующим образом [2–5].

В зависимости от протяженности участков размывов верховых откосов дамб и плотин назначается необходимое число расчетных створов по которым будет выполняться расчет деформации. В случае наличия прямолинейного участка размыва, длиной до 100'м, рекомендуется назначать 3–5 прогнозных створов.

При прогнозе деформаций верхового откоса обязательным является определение линейных деформаций \overline{E}_S и $E_{вн}$ с последующим расчетом относительной деформации подводной части профиля и в итоге – искомой величины – m_2 (рис. 5.3).

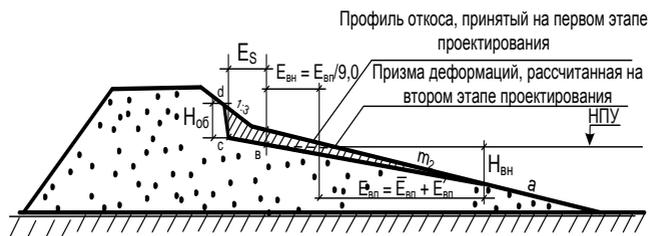


Рис. 5.3. Схема расчета деформаций верхового откоса дамбы (плотины)

Натурными наблюдениями установлено, что все морфометрические характеристики профиля откоса можно представить в виде суммы двух величин: неслучайной (E_{en}^*) всегда присутствующей и вероятностной или случайной (E_{en}'), зависящей от локальных условий и обеспеченности деформаций (рекомендуется принимать $P = 75\%$):

$$E_{en} = E_{en}^* + E_{en}' \quad (5.11)$$

Случайная составляющая E_{en}' определяется по зависимости вида:

$$E_{en}' = E_{en}^* \cdot k_{E_{en}} \quad (5.12)$$

где $k_{E_{en}}$ – модульный коэффициент, принимается по графику (рис. 5.4).

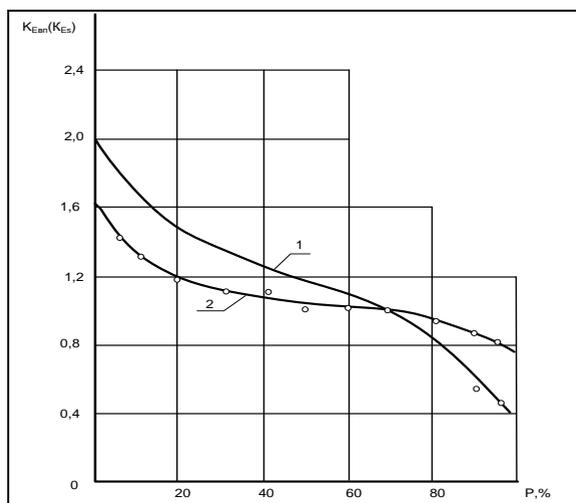


Рис. 5.4 График зависимости $k_{E_{en}} = f(P)$:
1 – водохранилища группы 1; 2 – водохранилища группы 2

Расчет неслучайной составляющей в уравнении, как для надводной части профиля дамбы или плотины, так и подводной части откоса на период равновесия выполняется по зависимостям:

$$\overline{E_S} = f_1[k_1(L_p/h_D); k_2(h_{1\%}/A_{\text{от}}); k_3(m_1\eta/A_{\text{от}})] + f_2[k_4(E_{\text{Л}}, E_{\text{ГВ}}, E_{\text{Т}})], \quad (5.13)$$

$$\overline{E_{\text{ВП}}} = f_3[k_1(L_p/\bar{h}_D); k_2(h_{25\%}/A_{\text{от}}); k_3(m_1\eta/A_{\text{от}})] + f_2[k_4(E_{\text{Л}}, E_{\text{ГВ}}, E_{\text{Т}})], \quad (5.14)$$

где $\overline{E_S}$, $\overline{E_{\text{ВП}}}$ – линейные деформации профиля откоса в надводной и подводной частях сооружения, м;

L_p – величина расчётного разгона волны, м;

$A_{\text{бл}}$ – амплитуда колебания уровня в верхнем бьефе водохранилища в безледный период, м;

$h_{1\%}$, $h_{25\%}$ – соответственно высота волны 1% и 25% обеспеченности, м; при расчетной скорости ветра принимаемой по справочнику [9];

m_1 , m_2 – коэффициент исходного откоса;

η – коэффициент неоднородности грунта, из которого возведено напорное сооружение.

Определение абсолютных деформаций профиля верхнего откоса в надводной и подводной частях склона выполняется графическим способом при помощи номограмм, изображённых на рис. 5.5; 5.6.

Для удобства пользования номограммами производится предварительный расчёт безразмерных характеристик L_p/h_D ; $h_{1\%}/A_{\text{от}}$; $m_1\eta$. Затем при помощи «ключа», приведенного на номограмме, выполняется определение величин $\overline{E_S}$, $\overline{E_{\text{ВП}}}$.

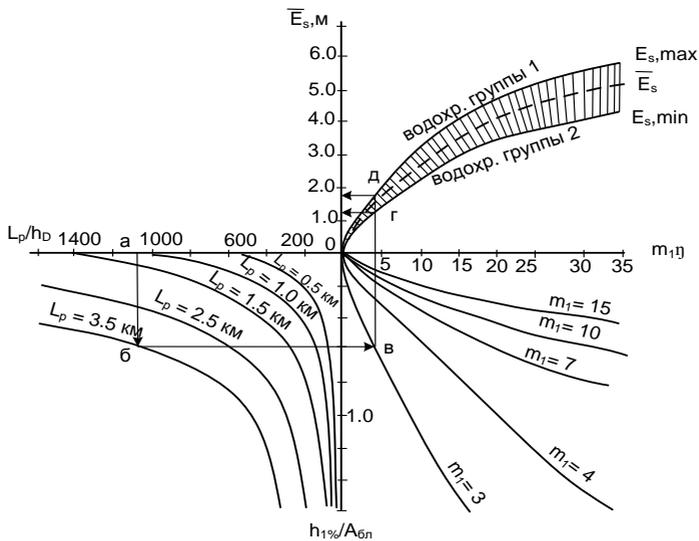


Рис. 5.5. Определение абсолютных деформаций надводной части откоса

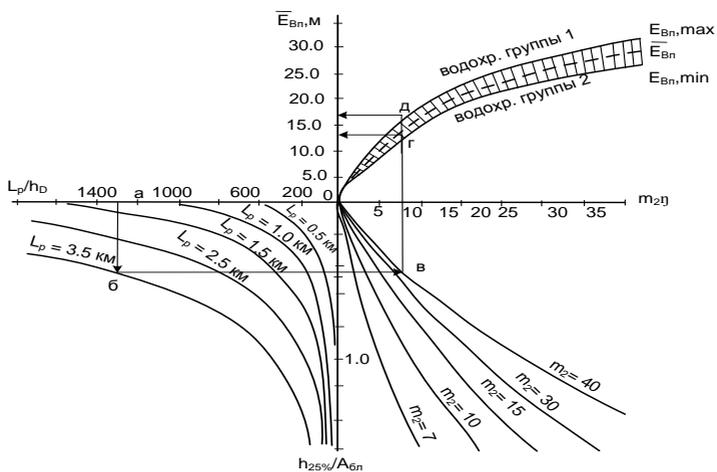


Рис. 5.6. Определение абсолютных деформаций подводной части откоса

Глава 6

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРИМЕНЕНИЯ КРЕПЛЕНИЙ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ ПОЛЕСЬЯ

Водоохранилища представляют собой сложные природно-технические комплексы. Создаваемые на базе рек, озер в различных хозяйственных целях водоохранилища оказывают отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Наиболее опасным явлением, приводящим к изъятию земель из хозяйственного оборота, нарушению безопасности функционирования дорог, линий электропередач (ЛЭП), является переработка (абразия) естественных берегов и незакрепленных верховых грунтовых откосов дамб и плотин.

В Беларуси эксплуатируется более 150 водоохранилищ (водоемов, имеющих полный объем более 1,0 млн. м³), протяженность берегов которых составляет более 1500 км [1–3]. Строятся гидроузлы и водоохранилища на р. Неман: Гродненская и Немновская ГЭС, на р. Западная Двина (Витебская, Бешенковичская и Полоцкая ГЭС) и др. Только на водоохранилище Витебской ГЭС по предварительному прогнозу протяженность берегов, подверженных переработке, составит около 18 км, а на водоохранилище Гродненской ГЭС – около 10 км. В связи с этой важной водохозяйственной для Беларуси проблемой возникла необходимость обобщения накопленного фактического материала и результатов научных исследований на региональном уровне. Особый интерес представляет регион Белорусского Полесья и его водохозяйственная освоенность, в частности – строительство и эксплуатация водоохранилищ и гидротехнических сооружений на них.

В Полесье (рис. 6.1) в рамках программы Мелиорации Полесья (1967–1975 гг.), разработанной и реализованной в годы существования Советского Союза во второй половине XX века, на территории Беларуси было создано 37 водоохранилищ различ-

ного типа: русловых, озерных и наливных. Наибольшее их количество расположено в бассейне реки Припять – 28 водоемов различного хозяйственного назначения (рис. 6.2), а также в бассейне реки Западный Буг – 5 водоемов.



Рис. 6.1. Границы Белорусского Полесья [4]

В настоящее время, в силу различных причин: технических, экономических, организационных, а главным образом, экономических часть водных объектов, преимущественно наливных водохранилищ – выведены из эксплуатации. Поэтому реально функционирующих и используемых водохранилищ гораздо меньше (рис. 6.2).

Для областей Полесья характерно наличие обширных болотных массивов. Территория отличается выравненностью и слабой расчлененностью рельефа. В пределах Полесья около 75% площади области расположено на высоте 125–160 м над уровнем моря. К водохранилищам данного типа относятся: Любанское, Краснослободское, Солигорское и др. Особенности ландшафта Полесской низменности – равнинность, малые уклоны поверхности, большая водосборная площадь, способствуют долговременным наводнениям даже в относительно благоприятные годы, что дает основание относить Полесье к региону с часто повторяющимися чрезвычайными ситуациями.

Практически, зона Белорусского Полесья расположена на территориях бассейнов рек Припяти и Западного Буга, а также незначительной части бассейна р. Днепр. Все водохранилища региона по характеру наполнения можно разделить на 3 группы.

Первая группа: русловые водохранилища (Солигорское, Волчковичи, Лешня, Любанское, Красная слобода, Млынокское, Бобруйковское и др.). *Вторая группа: водохранилища озерного типа* (Погост, Чуриловичи, Селец, Береза и др.). *Третью группу* представляют водохранилища **наливного типа** (Судково, Малые Автюки, Оброво, Локтыши и др.).

Установлено, что на русловых водохранилищах переработка берегов составляет 25–40% длины береговой линии и наблюдается в приплотинной части водоема. На водохранилищах озерного и наливного типа переработке подвержено до 50% берегов.



Рис. 6.2. Динамика ввода в эксплуатацию водохранилищ наливного типа

Проблема безопасной эксплуатации гидроузлов Полесья в настоящее время приобретает особую актуальность, поскольку большинство водоемов имеет значительный период функционирования более 30–40 лет. На рис. 6.3 представлена расчетная вероятность аварийности гидротехнических сооружений гидроузлов Полесья в зависимости от года ввода водохранилищ в эксплуатацию.

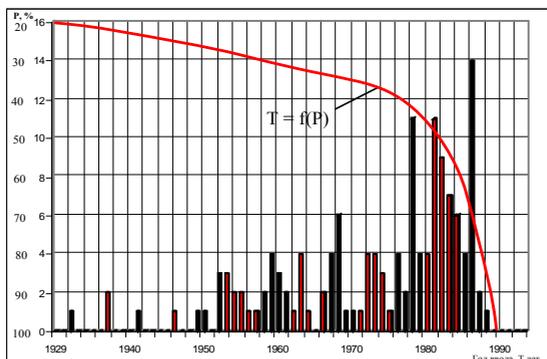


Рис. 6.30График вероятности повреждения гидротехнических сооружений в зависимости от их количества и года ввода в эксплуатацию [5]

В период выполнения комплексных исследований гидроузлов страны в том числе и Полесья в 2014–2019 гг. было обследовано более 100 водных объектов страны из которых 30 – это водохранилища Полесского региона. Были обследованы гидроузлы Солигорского водохранилища, водохранилищ: Любанское, Краснослободское, Локтыши, Селец, Волчковичское, Красная Слобода, Погост и ряда других. В период обследования оценивались: состояние естественных берегов и развитие береговых процессов - абразии (переработки) и аккумуляции, состояние верхних откосов напорных дамб и плотин, а также общее состояние гидротехнических сооружений, выявлялось наличие деформаций, разрушений, возможности возникновения чрезвычайных ситуаций. Фактический материал показал, что многие объекты находятся в крайне неудовлетворительном состоянии и требуют срочного вложения значительных средств на ремонт или их реконструкцию. В последние годы возникла проблема защиты населения, территории, окружающей среды от гидродинамических опасных факторов, приводящих к возникновению чрезвычайных ситуаций гидрологического характера. Одной из причин возникновения чрезвычайных ситуаций на вышеуказанных водоемах является разрушение береговых склонов, нарушение устойчивости берегоукрепительных

сооружений (повреждение швов, разрушение поверхности плит крепления, просадки и т.д.) напорных земляных сооружений-плотин и дамб обвалования. Использование системного подхода при изучении переработки берегов водных объектов позволило автору [1–3] установить, что в пределах трёх регионов страны (Позорье, Центральная часть и Полесье) (рис. 6.4.) можно выделить ряд районов, которые характеризуются различной интенсивностью процесса абразии. Полученная схема районирования совпадает с геологической и морфологической картами республики (рис. 6.1.) и отражает наиболее полно процессы, которые протекают в береговой зоне водохранилищ. Из рис. 6.4, видно, что величина линейной переработки береговых склонов (S_l) для различных регионов страны отлична и колеблется в пределах от 5 до 40 м [1,2]. В зоне Полесья этот показатель составляет в западной и центральной частях региона от 5,0 м до 25 м, в южной и восточной от 5,0 до 7,0 м.

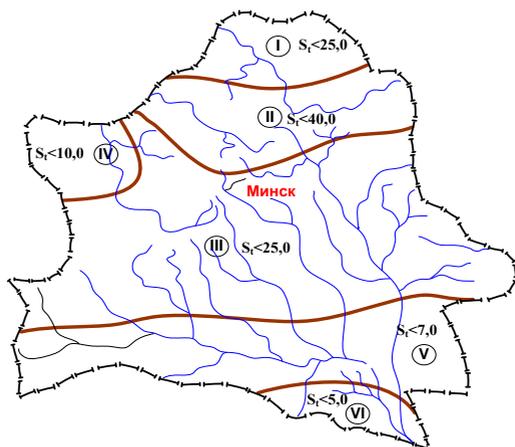


Рис. 6.4. Схема районирования территории Республики Беларусь по величине линейной переработки [1, 2]

Материалы натуральных исследований по ряду водохранилищ, а также карты районирования страны по развитию абразии на водохранилищах Полесья позволили дать оценку возможных масштабов деформации береговой линии в регионе. Как известно пе-

риоду ледостава соответствует понижение (сработка) уровней в чаще водохранилищ. В этот период лед лежит ниже береговой отметки и не оказывает никакого воздействия на берег. Учитывая тенденции глобального потепления климата [6], по данным НАН Беларуси и Института изучения глобального климата и экологии РАН, наблюдается изменения температурного режима многих европейских регионов, которые ведут к уменьшению времени ледостава и, соответственно, к увеличению сроков воздействия ветрового волнения на берег. Этот момент накладывает особый отпечаток на динамику и масштабы процесса деформаций берегов и незакрепленных откосов напорных грунтовых сооружений-дамб и плотин. Следует отметить, что суммарная протяженность берегов водохранилищ Полесья, подверженная переработке, т.е. абразии склонов составляет по современным оценкам около 12,5 км. Удельная протяженность абразионных берегов по каждому из водохранилищ не очень большая, носит локальный характер (табл. 6.1).

Таблица 6.1

**Характеристика переработки берегов водохранилищ
Полесья**

Название водохранилища	Район (область) расположения	Тип водохранилища	Протяжённость абразионных берегов, <i>Labp</i> , км
Малые Автюки	Калинковичский (Гомельская)	русловое	0,50
Волковичи (Птичь)	Минский (Минская)	русловое	0,75
Вить	Хойникский (Гомельская)	русловое	0,65
Млынокское	Ельский (Гомельская)	русловое	0,55
Красная слобода	Солигорский (Минская)	наливное	0,85
Любанское	Любанский (Минская)	русловое	0,65
Локтыши	Ганцевичский (Брестская)	русловое	0,70
Погост	Пинский (Брестская)	озерное	0,85
Солигорское	Солигорский (Минская)	русловое	1,85

Продолжение таблицы 6.1

Рудня	Солигорский (Минская)	русловое	0,40
Селец	Березовский (Брестская)	русловое	0,95
Лешня	Мозырский (Гомельская)	русловое	0,35

Необходимо подчеркнуть, что на территории белорусской части Припятского Полесья существует большое количество водохранилищ наливного типа, где в качестве берегов водоемов выступают верховые незакрепленные грунтовые откосы подпорных сооружений ограждающих дамб, дамб обвалования и плотин.

Кроме того, следует указать, что дамбы обвалования используются в качестве защитного мероприятия от затопления и образования мелководий на водохранилищах руслового типа (водохранилища Солигорское, Красная слобода) или же при строительстве водных объектов наливного типа (водохранилища Загатье, Коммунар, Оброво и т.д.). Высота дамб обвалования варьирует в широких пределах и редко превышает 5–7 м. Профиль дамб обвалования - наиболее часто распластанный, с уположенным верховым откосом, реже обжатой формы. В ряде случаев, верховые откосы дамб делаются уположенной формы и фактически являются берегозащитными пляжами (табл. 6.2).

Величины деформаций верховых незакрепленных откосов дамб и плотин ряда водохранилищ Полесья, полученные по данным натурных обследований приведены в табл. 6.2. Как видно из табл. 6.2 значения деформаций откосов близки к величинам деформаций естественных берегов. На рис. 6.5 приведены участки переработки береговых склонов на водохранилищах Полесья.

Таблица 6.2

Деформации незакрепленных откосов дамб Полесья

Название водохранилища	Длина участка размыва, м	Объем переработки верхового незакрепленного откоса Q_v , м ³ /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

Строительство подпорных и ограждающих сооружений гравитационного типа выполняется из грунта как с применением сухойих механизмов, так и с использованием гидронамыва, например, на водохозяйственном комплексе на р. Ясельда. Отмеченные типы сооружений отличаются технологичностью, простотой, экономичностью по сравнению с дамбами и плотинами обжатого профиля, имеющего крепление верховых откосов.



Водохранилище Солигорское



Водохранилище Завойть



Водохранилище Селец



Водохранилище Береза-1

Рис. 6.5. Переработка берегов водохранилищ Полесья

Анализ материалов по развитию процесса формирования берегов и деформаций откосов подпорных сооружений на водохранилищах Полесья, показал, что каждый регион страны имеет свои особенности, в том числе и рассматриваемый регион также имеет ряд специфических проявлений в деформациях береговых склонов и искусственных откосов. К этим особенностям следует отнести прежде всего следующее:

- во-первых, процесс формирования устойчивой береговой линии водохранилищ Полесья происходит в условиях однородных несвязных грунтов, что сказывается на сроках выработки профиля равновесия и устойчивой береговой линии в плане;
- во-вторых – это большая протяженность искусственных берегов, образованных дамбами обвалования и плотинами.

Суммарная протяженность искусственных берегов превышает протяженность естественных;

– в-третьих, масштабы деформаций как линейные, так и объемные, полученные на основе натуральных исследований, находятся в пределах, приведенных на карте районирования территории Беларуси по развитию процесса переработки на водохранилищах (рис. 6.6).



Водохранилище Лоша

Водохранилище Зельвянское

Рис. 6.6. Водохранилища Полесья

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОХРАНИЛИЩ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ И БЕРЕГОВ

7.1. Расчет креплений верховых откосов

В настоящее время для защиты верховых откосов дамб и грунтовых плотин в Беларуси в гидромелиоративном строительстве широко применяются; следующие виды креплений [1–12]:

- а) каменные;
- б) железобетонные сборные и монолитные с обычной и предварительно напряженной арматурой;
- в) комбинированные, состоящие из отдельных сборных железобетонных плит, уложенных на откосе в шахматном порядке, и монолитные железобетонные плиты, бетонируемые на откосе;
- г) асфальтобетонные;
- д) железобетонные решетчатые сборные с заполнением клеток неотсортированным камнем;
- е) наброска из неотсортированных крупнозернистых материалов;
- ж) грунтобиологические.

Вид крепления выбирается в каждом конкретном случае на основании технико-экономического сопоставления вариантов с учетом возможности выполнения его с максимальным использованием средств механизации и местных материалов и оценки его долговечности в период эксплуатации.

Крепления откосов из сборных железобетонных плит допускается выполнять с открытыми швами. Отдельные плиты должны быть соединены между собой путем сварки выпусков рабочей арматуры. При этом, под плитами следует предусматривать обратный фильтр из одного слоя естественной гравелистой смеси, если защищаемый грунт при насыщении водой не

разжижается (гравий, средне- и крупнозернистый песок, глина, устойчивая к морозному пучению, и др.), и не менее двух слоев материала с различными по крупности частицами в случае грунтов, способных к оплыванию при насыщении их водой (супеси, мелкозернистые пески, суглинки и др.) [9].

Толщина каждого слоя фильтра должна быть не менее $(5 \div 7) D_{85}$. При этом наименьшую общую толщину обратного фильтра t_ϕ следует принимать по условиям производства работ:

- при ручной укладке $t_\phi \geq 0,10$ м;
- при механизированной укладке $t_g \geq 0,20$ м;
- при укладке под воду $t_g = 0,20$ м.

Крупность материала фильтра устанавливается по следующей зависимости:

$$D_{50} \leq \eta_\phi d_{50} \quad (7.1)$$

где η_ϕ – коэффициент, неоднородности материала фильтра определяемый по выражению

$$\eta_\phi = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad (7.2)$$

где D_{50} и d_{50} – диаметры фракций, содержание которых соответственно в материале фильтра и в защищаемом грунте составляет 50% по весу, м.

Кроме того, крупность верхнего слоя обратного фильтра под плитами должна удовлетворять условия

$$D_{17} \geq \alpha'_p C_p, \quad (7.3)$$

где D_{17} – диаметр фракции, содержание которой в материале фильтра составляет 17% по весу, м;

C_p – расчётная ширина щели (шва) между плитами (картами), определяемая по конструктивным соображениям, м;

α'_p – коэффициент, зависящий от коэффициента разнородности фильтрующего материала η_ϕ , принимаемый по табл. 7.1.

Таблица 7.1

Зависимость коэффициента α'_p от разнородности

η_ϕ	2	5	10	30
α'_p	2,5	0,6	0,3	0,05

Если верховой откос крепится монолитным железобетонным или сборными железобетонными плитами, замоноличенными в карты, то под плиты следует предусматривать однослойную подготовку из грунта любого гранулометрического состава, удовлетворяющего условию (7.1).

При креплении откоса сборными железобетонными плитами следует устраивать сплошной обратный фильтр плиты необходимо укладывать длинной стороной параллельно гребню плотины и соединять их между собой шарнирно.

Железобетонные решетчатые плиты соединяют между собой также шарнирно. Толщину фильтрующей наброски и пористых плит t_n (м) назначают по условиям производства работ (для наброски 15–20 см, для плит 5–7 см) но не менее толщины, полученной по формуле:

$$t_n = K_3 \frac{4,5}{l^{2.03m_2}} \frac{(1,25H_0 + 0,33h_{kn})\gamma}{f(\gamma_n - \gamma)} \quad (7.4)$$

где γ_n – удельный вес материала наброски, H/m^3 ;

γ – удельный вес воды, H/m^3 , $\gamma = 1 H/m^3$;

l – основание натуральных логарифмов;

K_3 – коэффициент запаса устойчивости наброски.

Для пористых и решетчатых плит $K_3 = 1,30$, для наброски из крупнозернистого материала $K_3 = 1,5–1,6$.

Если низовой откос подвержен воздействию волн и льда со стороны нижнего бьефа, то его крепление следует предусматривать таким же, как и. верхового откоса, учитывая предусмотренные дренажные устройства.

Крепление откосов в виде наброски из неотсортированных крупнозернистых материалов можно применять при высоте волны не более 1,0 м во всех случаях, когда на месте строительства или вблизи него имеются пригодные для этой цели гравий, галька, щебень, крупнозернистый песок или грунт, содержащий крупнообломочные фракции в объеме не менее 15–20% от общего объема.

Расчетный диаметр элементов наброски D_{H50} (м), устойчивых против размывающего действия волн в зоне их обрушения при динамическом равновесии элементов, определяют по графикам (рис. 7.1) [9].

Где $h_{2\%}$ – расчетная высота волны обеспеченностью 2% в системе волн, м;

$$\lambda_0 = \frac{\bar{\lambda}}{h} \text{ – относительная длина волны;}$$

D_{H50} – диаметр фракции, содержание которой в смеси наброски составляет 50% по весу, м;

$$\eta_n = \frac{D_{H60}}{D_{H10}} \text{ – коэффициент разнотерности материала наброски.}$$

Для обеспечения суффозионной устойчивости защищаемого грунта откоса следует соблюдать соотношение

$$\frac{D_{H50}}{d_{50}} \leq K_m$$

При несоблюдении этого условия необходимо предусматривать подготовку под наброску. В этом случае диаметр наброски рассчитывают на статическую устойчивость, что соответствует удвоенному значению диаметра при динамическом равновесии.

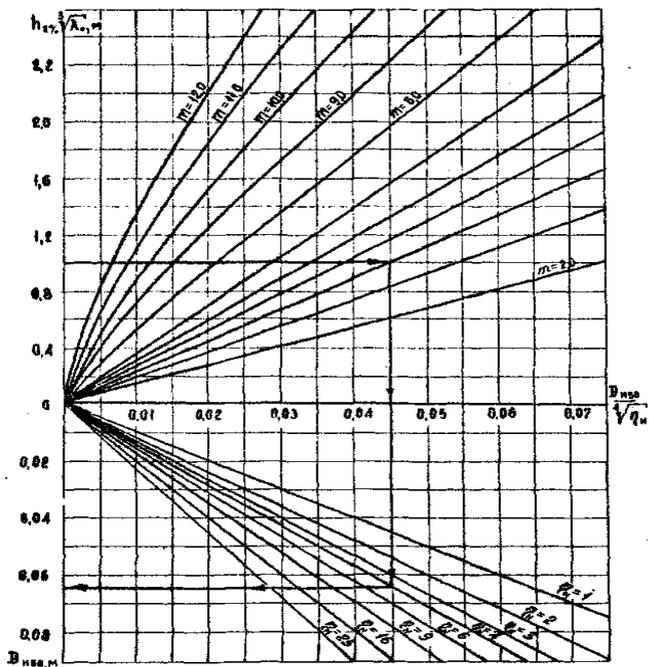


Рис. 7.1. Расчёт диаметра наброски по формуле Е. Цайтца [9]

Толщину наброски t_H (м) определяют в зависимости от расчётных параметров волн, заложения откоса и диаметра наброски.

Поперечный размер элемента D , приведенного к шару, определяется по формуле:

$$D = 2,20 \sqrt[3]{\left(\frac{\gamma}{\gamma_n - \gamma}\right) \left[\frac{0,226 h_{2\%}^3 \sqrt{\lambda_0}}{m_1^{2/3}}\right]^{1/n}}, \quad (7.5)$$

где γ – удельный вес воды, H/m^3 , $\gamma = 1 H/m^3$;

γ_n – удельный вес элемента, H/m^3 ;

$$n = 1 \text{ при } 1 \leq m \leq 6,5,$$

$$n = 1,81 - \lg m \text{ при } 6.5 \leq m \leq 30.$$

$h_{2\%}$ – расчетная высота волны обеспеченностью 2% в системе волн, м;

$$\lambda_0 = \frac{\bar{\lambda}}{h} \text{ – относительная длина волны.}$$

Если основанием плотины служат слабые грунты, допускается неравномерность осадки в процессе эксплуатации сооружения.

7.2. Критерии устойчивости откосов, предназначенные для расчета креплений

Как известно, процесс развития берегов (откосов), сложенных несвязными грунтами, завершается выработкой динамически устойчивого профиля с более крутым участком пляжа в зоне уреза и наката и более пологим в пределах подводного берегового склона [13, 14]. Конечная стадия выработки профиля берега фронтальным волнением называется *профилем динамического равновесия* [15].

Для определения заложения волноустойчивых откосов в морских условиях и условиях крупных водохранилищ, формируемых под воздействием волновых потоков используются известные зависимости Н. Н. Джунковского, Д. Путнама, С. А. Офицерова, Дж. Тейлора, В. П. Зенковича, В. Н. Шайтана, Ю. А. Сокольниковой, А. Б. Пышкина, В. Л. Максимчука, Е. Цайтца и др.

Решение задачи об определении условий устойчивости частиц грунта на профиле равновесия, применительно к водохранилищам Беларуси рассматривалось ранее в работах [16, 17].

Следует также отметить, что табличные значения скоростей потока и зависимости по определению донных скоростей в работах [13–15] приведены для условий горизонтального или слабо наклонного дна, т.е. для случая, когда на частицу не действует сдвигающая сила, являющаяся составной частью силы

тяжести. И только для откосов, в случае расположения элемента грунта на поверхности подводной части береговой отмели, подверженной воздействию волнения (т.е. на первой начальной стадии формирования профиля равновесия), в результате увеличения роли этой составляющей в системе сил, определяющих их устойчивость, подвижка зерен происходит при скоростях потока меньших, чем расчетные или табличные.

Для анализа воздействия комплекса сил, действующих на элемент грунта, находящийся на поверхности береговой отмели в волновом потоке, использовался метод определения предельного состояния откоса. Этот метод дает возможность на основе учета действующих сил, оценить местную устойчивость профиля откоса.

Рассматривался элемент грунта, находящийся на откосе ниже зоны разрушения волны (в подводной части отмели), по которой движется волновой поток. Условие предельного равновесия элемента грунта, объемом W и площадью F , расположенного на откосе под углом α к горизонту, будет определяться соотношением следующих сил:

- *силы тяжести* G частицы, погруженной в воду $G = W\gamma_0$,
- где W – объем элемента грунта, $м^3$;
- γ_0 – удельный вес грунта во взвешенном водой состоянии, $Н/м^3$;
- *предельной влекущей силы, создаваемой волновым потоком* τ , стремящейся сдвинуть элемент грунта вниз по откосу

$$\tau = F\gamma_в h \sin \alpha, \quad (7.6)$$

где F – площадь элемента грунта, $м^2$;

$\gamma_в$ – удельный вес воды, $Н/м^3$;

h – глубина, $м$;

- *волнового взвешивающего давления* $P_{взв} = Fa\gamma_в h_в$, $Н/м^3$,

где a – эмпирический коэффициент, $a = 0,27$, принятый по [16];

$\gamma_в$ – удельный вес воды, $Н/м^3$;

- *удерживающей силы* $T_0 = W\gamma_0 \cos \alpha$, $Н/м^3$;

- *сдвигающей силы* $P_{ск} = W\gamma_0 \sin \alpha$, $Н/м^3$.

Уравнение предельного равновесия имеет следующий вид:

$$W \gamma_0 \sin \alpha + F \gamma_b h \sin \alpha = (W \gamma_0 h \cos \alpha - F a \gamma_b h_b) f, \quad (7.7)$$

Преобразовав уравнение (7.7) соответствующим образом путем деления выражение на F , и затем разделив на $\sin \alpha$, считая в воде $\gamma_0 / \gamma_b = \rho_0 / \rho_a = \rho_0^I$,

Где ρ_0, ρ_a – плотность зерен грунта во взвешенном состоянии и воды, кг/м^3 ;

$$\rho_0^I \text{ – относительная плотность, } \rho_0^I = \rho_0 / \rho_a,$$

Затем приравняв левую и правую части уравнения получаем критерий устойчивости частиц грунта на профиле динамического равновесия Π_I :

$$\Pi_I = \frac{\rho_0^I (mf - 1) d}{h + ah_{1\%} f \sqrt{1 + m^2}} \quad (7.8)$$

В выражении (7.8) для несвязных однородных грунтов с коэффициентом однородности равным $\eta = d_{60}/d_{10} \geq 2,0 - 2,5$, принимается $d = d_{50}$.

На стадиях формирования устойчивого откоса, а это первые 3–5 лет после заполнения водоема, величина Π_I всегда менее 1. На заключительной стадии (ориентировочно в условиях Беларуси этот период составляет около 10 лет) форма профиля равновесия откоса приобретает устойчивый контур, а величина $\Pi_I \geq 1$.

На стадии стабилизации, характеризуемой затуханием процесса деформаций во времени происходит развитие вдольберегового перемещения материала переработки вдоль уреза воды при котором критерий устойчивости откоса приобретает совершенно иной физический смысл.

Представив уравнение равновесия с учетом сил взвешивания грунта водой и косоподходящего волнения под углом θ к урезу воды суммарная величина сдвигающей силы (N_{cd}) определится выражением

$$N_{cd} = \sqrt{\gamma_0^2 w^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25(a_0 F \gamma_e \pi)^2 (h_e n)^4 \cos^2 \theta}{\lambda^2 s h^2 \frac{4\pi H}{\lambda}}} \quad (7.9)$$

Удерживающее усилие (N_{yd}) будет

$$N_{yd} = \gamma_0 W f \cos \alpha \cos \theta \quad (7.10)$$

где f – коэффициент внутреннего трения грунта. Приравняв сдвигающие и удерживающие силы, получаем уравнение динамического равновесия при этом поделив левую и правую часть уравнения на произведение $F \cdot \sin \alpha \cos \theta$ и учитывая, что $W / F = d; \cos \alpha / \sin \alpha = m; 1 / \sin \alpha = \sqrt{1 + m^2}$, получим соотношение величин N_{yd} и N_{cd} , которое будет являться критерием устойчивости профиля динамического равновесия. Обозначив

$$\frac{\gamma_0 d}{\cos \theta} = \xi, \quad (7.11)$$

$$\frac{a_0 \gamma_e \pi (h_e n)^2 \sqrt{1 + m^2}}{\lambda s h \frac{4\pi H}{\lambda}} = \xi_2 \quad (7.12)$$

Получаем выражение для критерия устойчивости Π_2

$$\Pi_2 = \frac{\gamma d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + 0,25 \xi_2^2}} \quad (7.13)$$

На основании исследования, проведенного доктором технических наук, профессором Э.И. Михневичем совместно с автором, были получены критерии устойчивости $П_1$ и $П_2$ для условий вдольберегового переноса материала переработки откоса в виде потока наносов [16]. При этом была разработана и предложена оригинальная методика расчета устойчивости креплений верхних откосов подпорных сооружений [17], которая кратко представлена ниже.

Известно, что верховые откосы земляных плотин подвержены разрушающему воздействию ветровых волн, возникающих в акватории водохранилищ. Для предотвращения разрушения откосов применяют различные типы креплений, среди которых наибольшее распространение получили каменная наброска и сборные (реже монолитные) железобетонные плиты [11, 16, 17].

В зоне интенсивного волнового воздействия располагают основное крепление, а ниже его облегченное. Верхней границей основного крепления обычно является отметка гребня плотины, а при его значительном возвышении над уровнем воды в верхнем бьефе — величина наката волны на откос. Нижняя граница основного крепления назначается на отметке, заглубленной под минимальный уровень верхнего бьефа на величину $2h_e$ (h_e — высота расчетной волны) [17]. Расчетные параметры волн определяют в зависимости от скорости ветра, длины разгона волны, глубины водохранилища в соответствии с ТКП.

Для определения диаметра камня наброски и толщины плит крепления откосов предложены различные экспериментальные зависимости [17]. Значения параметров креплений, определяемые по этим зависимостям, значительно различаются между собой и не всегда пригодны для малых водохранилищ Беларуси. Для расчета диаметра материала каменной наброски Э. И. Михневичем были учтены сдвигающие силы: взвешивающее волновое давление, зависящее от высоты волны; влекущая сила потока, образующегося на откосе при откате волны; сдвигающий компонент силы тяжести материала крепления, зависящий от заданного коэффициента заложения откоса. Удерживающие силы определены с учетом ос-

новых физико-механических свойств материала наброски: плотности частиц во взвешенном водой состоянии, пористости, внутреннего трения и удерживающего компонента силы тяжести материала крепления. При разработке методики расчета толщины железобетонных плит влекущая сила потока не учитывалась, так как формируемый на поверхности плит поток практически не оказывает влияния на их устойчивость. В нижней зоне откоса, где гидродинамическое давление создается придонной скоростью, устраивают облегченное крепление обычно в виде наброски из щебня, гравия или мелкого камня. В результате преобразования критерия устойчивости откоса Π_1 (7.6) в этой зоне получены зависимости для определения крупности материала наброски.

Облегченное крепление, располагаемое ниже основного на глубине $H > 2h_0$, выполняется в виде наброски из щебня, гравия или мелкого камня. Крупность материала облегченного крепления определяют из условия его устойчивости под воздействием придонных скоростей v_0 , возникающих при волнении [11]. С учетом сил взвешивания частиц водой и внутреннего трения материала наброски, а также косоподходящего ветрового волнения под углом θ к урезу воды получены суммарная сдвигающая сила $N_{сд}$ и удерживающая сила $N_{уд}$. Приравняв удерживающую и сдвигающую силы и поделив их значения на произведение $F \cdot \sin\alpha \cdot \cos\theta$, получено уравнение предельного равновесия и критерий устойчивости откоса Π_3 в зоне устройства облегченного крепления (от $H = 2h_0$ до подошвы откоса), который имеет вид

$$\Pi_3 = \frac{\gamma_1 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}} \quad (7.14)$$

Принимая в условиях предельного равновесия $\Pi_3 = 1$, получаем значение диаметра D материала наброски в зоне облегченного крепления

$$D = \frac{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}{\gamma_1 f m} \quad (7.15)$$

В формулах (7.15; 7.16) приняты обозначения, приведенных выше для P_1 . Предложенные формулы для расчета параметров креплений откосов земляных плотин могут быть рекомендованы к применению в проектных организациях для водохранилищ различных размеров, в том числе малых водохранилищ Беларуси.

Позже, основываясь на приведенной выше методике профессора Э.И.Михневича, А.В. Бузуком на основании анализа сил, действующих на плиты крепления с учетом деформаций откосов и раскрытия швов был получен универсальный критерий устойчивости P_k , [18]:

$$P_k = \frac{\rho'_s (mf - 1) d}{\left[\frac{0,02v^2}{2g} + 0,27(1 - n_s) h_g f \right] \sqrt{1 + m^2}}, \quad (7.16)$$

где обозначения те же, что и в (7.1–7.5).

Таким образом, в разделе приведен ряд полученных экспериментальным путем критериев: P_1 , P_2 , P_3 и P_k , характеризующих с одной стороны – динамику процесса формирования откосов, сложенных несвязными грунтами, а с другой, учет присутствия крепления железобетонными плитами. Полученные расчетные зависимости и критерии устойчивости позволяют более обоснованно на стадии проектирования определять оптимальный тип крепления откосов дамб, плотин и берегов, сложенных несвязными грунтами.

7.3 Нарушение устойчивости креплений откосов при их эксплуатации

Разрушения креплений откосов и берегов ведет к нарушению местной устойчивости и в результате необратимых, возрастающих синергически связанных процессов (разрушение креплений, вымыв грунта из под плит креплений, образование суффози-

онных выносов, развитие контактной и общей фильтрации и т.д.) ведет к нарушению общей устойчивости подпорных сооружений и как итог – к возникновению чрезвычайных и аварийных ситуаций.

В результате недостаточно эффективной эксплуатации водных объектов в Республике произошел ряд техногенных аварий, приведших к серьезным последствиям, повлекшим значительный материальный и социально-экономический ущерб.

Так в период весны 2010 г. на границе Ельского и Наровлянского районов Гомельской области в период полевого обследования водохранилищ региона экспедиционной группой, состоящей из специалистов НАН Беларуси и Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь была зафиксирована авария водосбросного сооружения на Млынокском водохранилище. Причинами аварии как показал анализ явились в первую очередь плохая эксплуатация объекта, приведшая к разрушению крепления верхового откоса подпорного сооружения, выносу грунта из тела плотины, развитию фильтрации через земляную плотину и контактной фильтрации вдоль водосброса и последующему разрушению водосбросного сооружения (рис. 7.2–7.3). Разрушения были настолько велики, что только через 9 лет после аварии гидроузел был восстановлен (рис. 7.4).



Рис. 7.2. Млынокское водохранилище. Разрушение крепления откоса (2010 г.)



а) верхний бьеф (2010 г.)

б) нижний бьеф (2010 г.)

Рис. 7.3. Млынокское водохранилище. Разрушение водосброса

Аналогичные аварии гидроузлов произошли в Брестской области в Ганцевичском районе, Гродненской области на Войковской ГЭС и других объектах.

К сожалению, количество аналогичных аварий в увеличивается. Так, весной 2019 г. при строительстве ГЭС на р. Ипуть в г. Добруше в результате нарушения технологии производства работ произошло развитие фильтрации через тело дамбы, ее просадкам и последующим местным обрушениям (рис. 7.5).



Рис. 7.4. Млынокское водохранилище. Восстановленный гидроузел (2019 г.)



Рис.7.5. Обрушение откосов дамб обвалования ГЭС. г. Добруш (2019 г.)

На водоемах технического назначения ОАО «Мозырь-соль» при вводе объекта в эксплуатацию (2018–2019 г.г.) произошло разрушение откосов разделительной и ограждающих дамб. В результате ошибок, допущенных при проектировании комбинированного крепления откосов, состоящего из сочетания геотекстиля, георешетки и пригрузки щебнем, в период заполнения водоемов была нарушена устойчивость откосов, что привело к обрушениям участка крепления суммарной протяженностью по фронту более 400 м (рис 7.6).

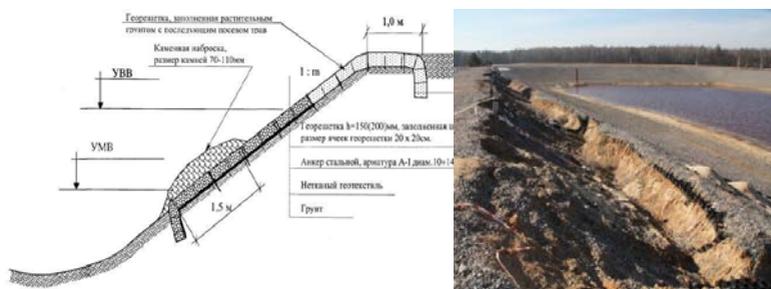


Рис. 7.6. Обрушение откосов дамб обвалования водоемов технического назначения ОАО «Мозырь-соль» (2018 г.)

Для обеспечения устойчивости и защиты откосов от ветрового волнения в проекте была предусмотрено крепление в виде сочетания: противofильтрационного экрана, выполняемого из геомембраны (полиэтиленовой пленки LDPE) толщиной 1,5 мм, песчаной отсыпкистилающего слоя толщиной до 0,30 м, выравнивающего слоя толщиной от 0,25 до 0,95 м, слоя геотекстиля – синтетического фильтрующего материала из стекловолокна с наноструктурными волокнами, выполняющего роль обратного фильтра.

Важно отметить, что в проекте не была рассчитана устойчивость откосов на сдвиг при возникновении плоскости скольжения между креплением и пленкой в соответствии с предложениями и расчетными зависимостями. Кроме того, в проекте были приняты заведомо более крутые заложения откосов, которые способствовали возникновению аварийной ситуации.

Сочетание всех условий и факторов обеспечило возникновение и развитие деформаций откосов ограждающих дамб, которое привело к нарушению устойчивости сооружений.

Глава 8

НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВ И ОТКОСОВ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

8.1. Применение полимерных материалов и синтетических покрытий

В последние годы в различных странах мира активно ведутся работы по защите побережий от развития абразивных процессов с использованием современных технологий и материалов. В качестве берегозащитных мероприятий в ряде случаев используют сочетание традиционных берегозащитных дамб с применением современных синтетических покрывных и противофильтрационных материалов. Защитные набросные откосные крепления широко используются как в портовом строительстве, так и в берегоукреплении. В работе И. Г. Кантаржи, С. Л. Кивва, Н. В. Шунько [1] рассматривается новая технология берегоукрепления под названием «Эластокоаст» (Elastocoast), разработанная немецким химическим концерном BASF.

Основная идея берегоукрепительной технологии «Эластокоаст» заключается в создании на поверхности пляжа или конструкции откосного сооружения проницаемого покрытия с открытыми порами из гравия или щебня, склеенного между собой. Важной особенностью покрытия является тот факт, что вяжущее вещество не заполняет полностью поры между щебнем, а склеивает его только в местах соприкосновения отдельных частей друг с другом. Это позволяет достичь проницаемости защитного покрытия.

Система «Эластокоаст» представляет собой новый тип защитного покрытия, которое может применяться в зоне действия волн, в зоне заплеска или на внутренних откосах дамб. Она состоит из сыпучего материала, скрепляемого двухкомпонентной полиуретановой связкой. В системе «Эластокоаст» каждый

отдельный камень покрыт тонкой пленкой полиуретана. При отверждении эта пленка скрепляет камни воедино только в контактных точках, сохраняя проницаемость и открытость структуры защитного покрытия.

Имеется успешный опыт применения технологии «Эластокоаст» в Европе на ряде берегозащитных объектов. Этот опыт в виде обобщений представлен в опубликованных материалах [2–5]. Пример берегоукрепления с использованием технологии «Эластокоаст» на о. Аструм, который расположен в Северном море недалеко от Гамбурга, показан на рис. 8.1.

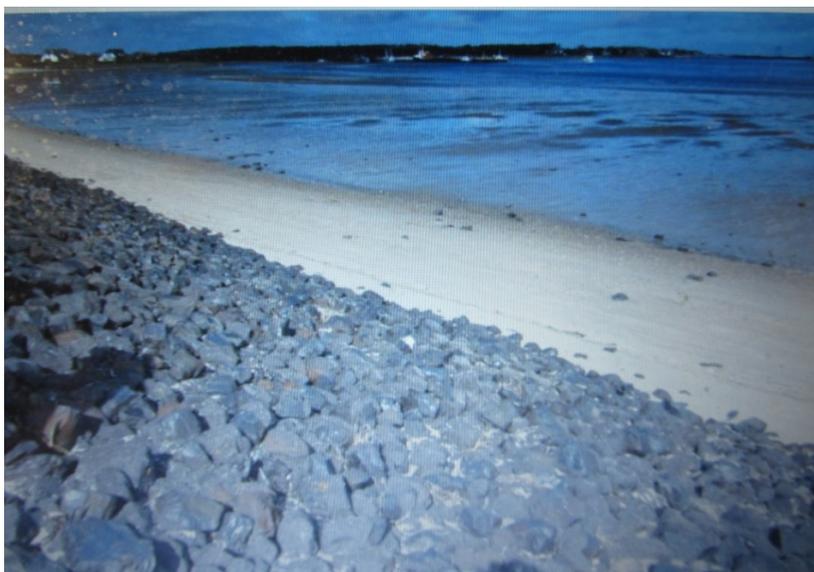


Рис. 8.1. Берегозащитный откос с использованием технологии «Эластокоаст» на о. Аструм. Северное море, Германия, г. Гамбург [1]

Применение технологии «Эластокоаст» в защитных покрытиях откосов морских дамб, ограничен высотой волн 1,5 м.

В Российской Федерации существует ряд предприятий производителей противофильтрационных и защитных покрытий отко-

сов. Например, производственное предприятие «ПромГеоПласт» (г. Новосибирск) предлагает конструкции противофильтрационных и защитных покрытий откосов дамб и плотин на основе использования геомембраны «ПромГеоПласт» по ТУ2264-001-30794641–2012 собственного производства (рис. 8.2; 8.3).



Рис. 8.2. Крепление верхового откоса плотины Чижовского водохранилища



Рис. 8.3. Крепление откоса георешеткой

В Республике Беларусь также выпускается ряд современных синтетических покрытий откосов геомембраной типа «Дар-

нит», «Пинема» и др. Толщина данных пленок варьирует от 1,50 до 3,50 мм. С использованием геомембраны и георешетки произведено крепление откоса земляной плотины Чижовского водохранилища и верховых откосов ограждающих дамб на Солигорском водохранилище и ряде других объектов страны.

В последние годы наряду с отечественными защитными синтетическими материалами в стране получило распространение георешеток и геотекстиля *DuPont Typar SF*, одного из крупнейших мировых производителей химического концерна «Дюпон» (рис. 8.4; 8.5).

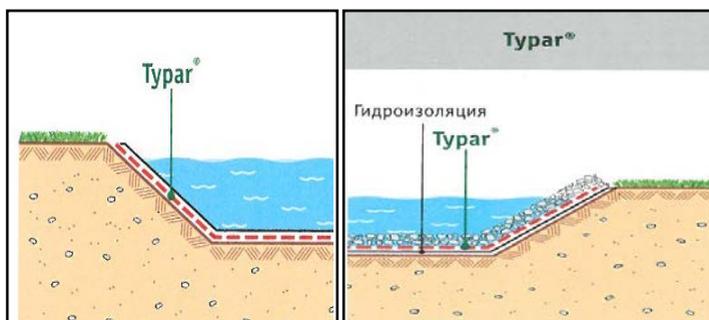


Рис. 8.4. Применение геотекстиля DuPont Typar SF при креплении откосов

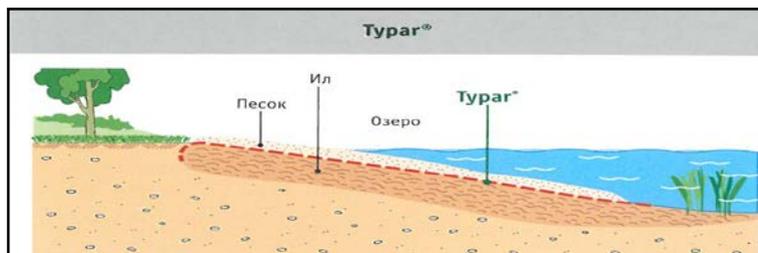


Рис. 8.5. Использование геотекстиля DuPont Typar SF при устройстве пляжа

Проектом строительства водохранилища Витебской ГЭС на р. Западная Двина для снижения последствий разрушений и

предупреждения переработки берегов на ряде участков береговой линии было предусмотрено проведение берегоукрепительных и берегозащитных мероприятий комбинированного типа, включающего планировку откосов, укладку антифильтрационного синтетического материала типа «Пинема», устройство проволочных «матрасов» с заполнением щебнем и креплением металлическими анкерами к откосу.

Изменение конструкции крепления было выполнено по предложению Заказчика—представительством Акционерной компании с Ограниченной Ответственностью «Corporation «China National Elektrik Engineering Co., Ltd» КНР в Республике Беларусь.

При изменении типа крепления были учтены новые технологии, применяющиеся в настоящее время в мировой практике, обеспечивающие соблюдение устойчивости откоса и долговечности службы крепления. Принятое конструктивное решение позволило значительно сократить сроки строительства и уменьшить стоимость работ. Ниже на рис. 8.6. приведены примеры основных типов берегозащиты, которые были применены на водохранилище Витебской ГЭС.



Рис. 8.6. Типы комбинированного крепления берега, используемые на водохранилище Витебской ГЭС

8.2. Новые конструкции бетонных креплений

Наряду с внедрением синтетических материалов ведутся работы по совершенствованию традиционных креплений из железобетона. В последние годы в стране применяется гибкое бетонное крепление (рис. 8.7; 8.8).



Рис. 8.7. Защита откосов гибким бетонным креплением. Солигорское водохранилище

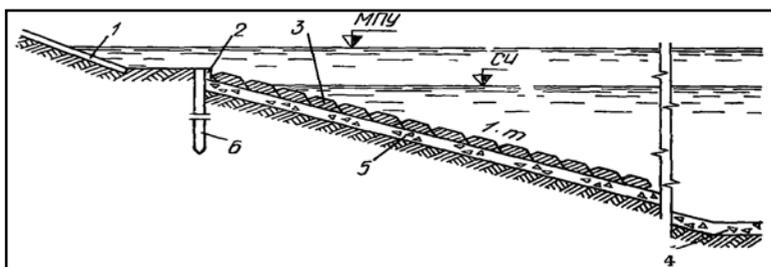


Рис. 8.8. Гибкие покрытия (тюфячного типа):

1 – откосное крепление; 2 – анкерная балка из монолитного железобетона; 3 – тюфяк из железобетонных плит; 4 – облепченное крепление; 5 – однослойная подготовка из разнозернистого гравия; 6 – железобетонная свая

Разработанная конструкция крепления откосов гибким, сквозным креплением включает сочетание мелкогабаритных заанкеренных элементов из железобетона с основой из гравийной подсыпки. Указанная конструкция крепления откосов получила достаточно широкое распространение на водохранилищах и мелиоративных объектах Беларуси: водохранилища Солигорское, Краснослободское, Селец, Клястицкой и Гомельской ГЭС и ряде других объектов (рис. 8.9).



Рис. 8.9. Солигорское водохранилище. Гибкое крепление откосов

На основе сведений натурных обследований состояния сооружений, лабораторных исследований, а также опубликованных материалов было выполнено обоснование конструктивных решений по креплению верховых откосов дамб и плотин, наиболее часто применяемых в условиях водохранилищ Беларуси. В ряде случаев предлагается использовать конструкции креплений, приведенных в работах Е. М. Левкевича, Н. В. Сурмы, Х. Р. Молеро, А. П. Чеплашкина, С. С. Агапакова, И. Г. Бельченко, М. В. Чукубаева, С. С. Чукубаевой, Б. В. Глазырина, которые отличаются конструктивными особенностями, себестоимостью и эффективностью.

Работы по разработке новых типов креплений откосов активно проводились и в БПИ в середине 70–80 х годов XX века. Было предложено на основании лабораторных исследований разрушения волнового потока на откосе несколько типов креплений, которые нашли свою реализацию в изобретениях и патентах, полученных Е. М. Левкевичем и Н. В. Сурмой [2, 3].

Кроме классических бетонных типов креплений откосов в Беларуси на ряде водоемов например, Лукомльская ГРЭС, Заславская ГЭС и других применяется крепление в виде отсыпки из отходов железобетонных конструкций. Данный тип крепления позволил закрепить берег и остановить процесс дальнейшей переработки (рис. 8.10).



Рис. 8.10. Крепление берега отсыпки отработанных железобетонных конструкций. Лукомльская ГРЭС

8.3 Инновационная технология берегозащиты, основанная на использовании эффекта сортировки неоднородного грунта

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, образуют-

ся береговые отмели покрытые валунами, галькой и др. крупно-фракционным материалом, устойчивым к воздействию волн, колебанию уровней, подвижкам ледового покрова и т.д. Валунно-галечниковый материал образует на поверхности отмели естественную «самоотмостку» из слоя наиболее крупных фракций за счет выноса, находящихся между ними более мелких частиц, препятствующую ее разрушению. В результате опытов было установлено, что одной из характеристик, определяющих динамическую устойчивость берегов в условиях водохранилищ Беларуси, является состав размываемого грунта, в частности – коэффициент неоднородности грунта – η [2,3]. Лабораторные исследования образования «самоотмостки», проведенные автором в гидротехнической лаборатории БНТУ, позволили изучить механизм закрепления поверхности отмели (рис. 8.11).

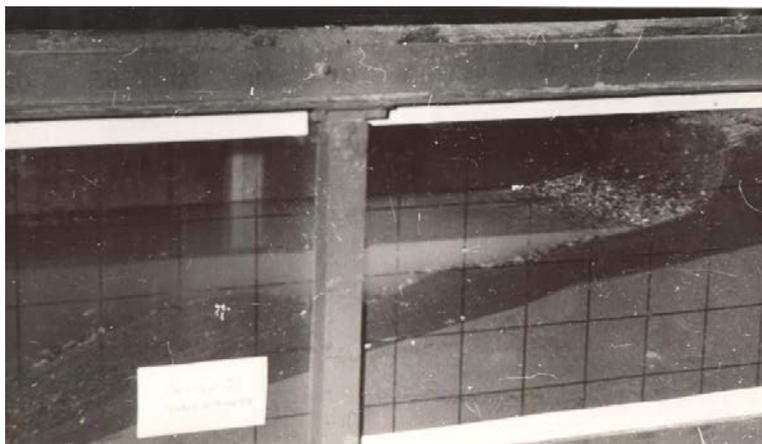


Рис. 8.11. Лабораторные исследования образования «самоотмостки» [2]

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. Исследовались модели с 1, 2, 3 и 4-х компонентными песчано-гравийными смесями, имеющие различный диаметр

частиц D_{50} и коэффициент неоднородности η_0 при содержании крупнозернистых включений: $P = 10; 25; 50$ 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 критериям А. С. Офицорова, Ж. Буссинеска и В. Л. Максимчука [3]. В качестве «оптимального» состава грунта, при котором наблюдался наибольший берегозащитный эффект была определена смесь, имеющая содержание гравелистых частиц равное $P = 25\%$.

Лабораторные эксперименты показали, а натурные наблюдения подтвердили, что возможно образование двух основных типов профиля, имеющего покрытие из крупнофракционного материала: первый, формируемый при размыве содержания крупных фракций более 25% , второй – при содержании крупных фракций менее 25% (рис. 8.12).

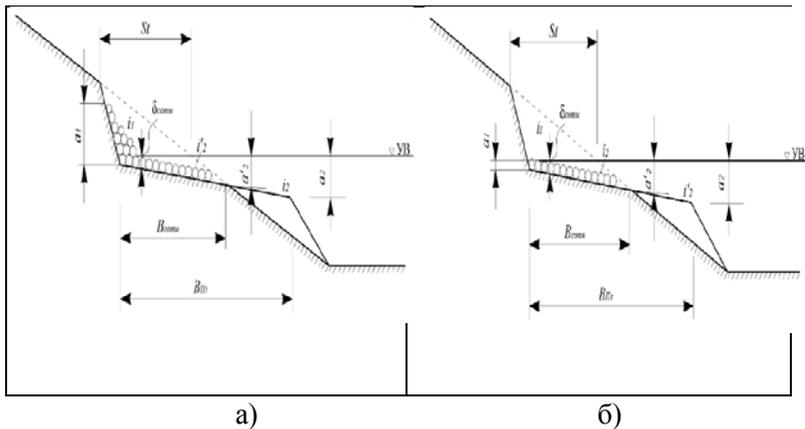


Рис.8.12. Форма профиля равновесия в зависимости от содержания крупнофракционного материала в грунте:
 а – профиль с призмой $25\% < P < 50\%$; б – профиль без призмы $10\% < P < 25\%$ [2,3]

В результате лабораторных опытов получен ряд зависимостей для расчета отдельных элементов профиля откоса, с «самоотмосткой» (табл. 8.1) [5, 6].

Таблица 8.1

Расчета элементов профиля с «самоотмосткой»

Тип профиля с самоотмосткой	Элемент профиля	Расчетная зависимость*
Самоотмостка с призмой на урезе при 25% ≤ P _{гр} ≤ 50%	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = (1,5 - 2,0) \delta_{отм}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a'_2 = 0,36 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} n_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a'_2 / 0,70$
	Уклон призмы самоотмостки выше уреза воды	$i_1 = 0,032 \left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{D_{50} n_0^{0,3}} \right)^{\frac{2}{3}} + i_0$
	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	$a_1 = \delta_{отм}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a'_2 = 0,27 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} n_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	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; λ_0 – относительная длина волны, м; D_{50}, d_{50} – средневзвешенная крупность частиц соответственно размываемого грунта и частиц самоотмостки, м; η_0 – коэффициент неоднородности размываемого грунта; i_0, i_1, i_2' – уклоны исходного профиля и поверхности элементов самоотмостки соответственно.

Возможность создания искусственной «самоотмостки» по аналогии с естественным процессом позволили разработать принципиально новую инновационную методику защиты разрушаемого берега, сложенного несвязными грунтами с повышенной неоднородностью [2, 3].

Использование и учет в практике проектирования берегозащитных мероприятий эффекта «самоотмостки» позволит сэкономить дорогостоящие стройматериалы, а также провести при минимальных затратах эффективную берегозащиту.

8.4. Оценка экономической эффективности применения новых типов креплений и берегозащиты

Эффективность использования явления самоукрепления откоса подтверждается сравнением затрат на укладку 1 м^3 гравия на закрепляемый откос и 1 м^3 песчано-гравийной смеси повышенной неоднородности. Для укладки гравия

$$C = T_p + П + C_2, \quad (8.1)$$

где $T_p, П, C_2$ – транспортные и погрузочные расходы, тыс.руб. Укладка же песчано-гравийной смеси требует следующих затрат

$$C = T_p + П, \quad (8.2)$$

Описанная выше инновационная технология предотвращения развития разрушений берегов водохранилищ путем генерирования эффекта «самоотмостким» из крупнофракционного материала, которую отличает высокая эффективность при отно-

сительной дешевизне, и высоком берегозащитном эффекте производящем надежное крепление откоса и препятствующее его дальнейшему размыву.

При выделении величины годовых расходов на эксплуатацию берегозащитных сооружений в отдельную статью затрат, не входящую в расходы всего гидроузла, определение экономической эффективности рассматриваемых вариантов защиты производится путем сопоставления суммы капитальных вложений и эксплуатационных расходов, т.е.

$$P_i = (M_i + k_i E_n) L_{абр}, \quad (8.3)$$

где P_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.

При строительстве гидроузлов и водохранилищ происходит затопление и подтопление значительных территорий. Защита территорий осуществляется с использованием ограждающих сооружений в виде земляных дамб. Верховые откосы дамб, как правило, закрепляются креплением активного или пассивного типа [2–7].

Объектом, для которого производился расчет эффективности прогнозных расчетов и предлагаемых типов креплений, было определено водохранилище Витебской ГЭС. Данное водохранилище, расположено на р. Западная Двина, имеет вытянутую в плане форму и береговую линию протяженностью около 60 км. По прогнозным расчетам [2], переработке будет подвержено около 40% береговой линии. Часть береговой линии в районе расположения населенных пунктов, а именно около 13 км, намечалось закрепить различного вида берегоукреплением, в

том числе: береговыми одеждами, биологическим креплением, уполаживанием откосов и применением комбинированного крепления. При расчете эффекта от внедрения инженерных мероприятий по креплению откоса рассматривался участок правого берега водохранилища Витебской ГЭС в районе садоводческого товарищества «Судостроитель». Разработанные предложения по мероприятиям вошли в строительный проект объекта № 121: «Строительство Витебской ГЭС на реке Западная Двина. Мероприятия по ложу водохранилища» (РУП «Белгипроводхоз», г. Минск). На стадии рабочего проектирования по предложениям автора совместно с аспирантом А.В. Бузуком на основе выполненных прогнозных расчетов по переработке склонов, даны практические предложения по защите берегов от совместного воздействия ветрового волнения, колебания уровней в верхнем бьефе, а также влияния внутриводоемных и вдольбереговых течений. На основании материалов лабораторных исследований переработки берегового склона и численного моделирования, а также натурных обследований, анализа проектных материалов и данных инженерно-геологических изысканий автором были подготовлены следующие предложения по изменению конструкции крепления, обеспечивающей поперечную и продольную устойчивость берегов, которые ведут к стабилизации процесса переработки:

- на участках с отметками 138,0 и 140,0 м (заложение откоса 1:2,5) намечена укладка проволочных матрасов с заполнением щебнем на подготовке в виде обратного фильтра;

- при отсыпке грунта выше отметки 140,0 м вдоль уреза предлагается выполнить устройство дренажа с отводом поверхностного стока и грунтовых вод;

- ниже отметки 138,0 м и до основания склона, имеющего заложение 1:3 ниже отметки НПУ, предусмотреть дополнительное крепление в виде каменных габионов на обратном фильтре;

- учитывая, что данный участок побережья находится в искусственно сжатом сечении водохранилища, образованном дамбами обвалования, расположенными на обоих берегах, рас-

четные продольные скорости стоковых течений имеют достаточно большие значения (от 0,73 до 3,2 м/с);

– для предотвращения сползания крепления предлагается устройство в основании склона каменнонабросной упорной призмы.

Экономический эффект получен на основании сравнения удельной стоимости 1 м пог. крепления откоса железобетонными проницаемыми плитами, принятому (по аналогии) для крепления откосов польдера № 2 по этому же водохранилищу (стоимость 125,2 тыс. руб./м пог., в ценах 1991 г.) и от предложений автора – в виде комбинированного крепления, состоящего в уполаживании откоса в сочетании с каменными габионами и упорной призмой (стоимость 81,5 тыс. руб./м пог., в ценах 1991 г.). Участок закрепляемого берега у садоводческого товарищества «Судостроитель» имеет протяженность $L_{\text{уч}} = 1850$ м. Экономия средств по устройству креплений составила

$$N_k = C_1 - C_2 = 125,2 - 81,50 = 43,7 \text{ тыс. руб./м пог.},$$

где C_1 – стоимость 1 м пог. крепления откосов железобетонными проницаемыми плитами, тыс. руб./пог. м;

C_2 – стоимость 1 м пог. предложенного варианта комбинированного крепления с использованием каменных габионов с упорной призмой, тыс. руб./м пог.

Экономический эффект от предлагаемого комплекса мероприятий по берегоукреплению, поученный на основе научно обоснованных предложениях по прогнозу переработки берегов и берегозащите составил в текущих ценах:

$$N_{\text{ýó}} = N_{\text{é}} \cdot l_{\text{ó.}} \cdot k_{\text{Ái}} = 43,7 \cdot 1850 \cdot 7,3491 = 5,941380 \text{ млрд руб.},$$

где $k_{Bo} = 7,3491$ – общий строительный коэффициент для Витебской области на ноябрь 2015 г. Внедрение предложений позволило изменить и улучшить конструкцию крепления откосов, в результате чего сокращены сроки строительства и уменьшена его стоимость.

Аналогичный эффект получен от внедрения мероприятий по берегозащите на объекте: «Инженерные мероприятия по строительству Хотомельского перепуска Столинского района Брестской области» (РУП «Белгипроводхоз», г. Минск). Величина экономического эффекта по данному объекту составила 1,072 млрд руб. (в ценах ноября 2015 г.) Внедрение предложений автора от прогноза деформаций откосов насыпи дорожного полотна, а также по организации инженерной защиты и крепления откосов, выполненное по объекту № 068-14: «Реконструкция автомобильной дороги М – 3 «Украина» – от Москвы через Калугу, Брянск до границы с Украиной (на Киев), на участках км 514+300 – км 518 + 494, км 519 + 146 – км 519+868, Брянской области» (ГП «Белгипродор»), позволило получить экономический эффект в размере 250,663 млн руб. (в ценах ноября 2015 г.).

Как показала практика, крепление откосов по предложенной технологии, в основе которой лежит эффект «самоотмокки» примерно в 10 раз экономичнее, чем отсыпка из дорогостоящего гравия или камня. В отличие от традиционных типов креплений откосов гравием или камнем, которые не всегда эффективно препятствуют деформациям и требуют от службы эксплуатации постоянной подсыпки и ремонта покрытия в местах локальных размывов, применение способа самоукрепления позволяет надежно закреплять и стабилизировать берег в течение 1–2 сезонов [5, 6]. Расчеты показали, 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.).

Изложенные предложения по расчету экономической эффективности и проектированию откосов дамб и плотин не исключают возможности применения и других технических решений, при этом они должны иметь соответствующее технико-экономическое обоснование.

В период 1996–2018 гг. был внедрен в производство ряд научно-обоснованных предложений:

– по прогнозированию переработки берегов и берегоукреплению на оз. Нарочь и устройству берегозащитных пляжей в пос. Занарочь, п/л Зубренок (генпроектировщик ОАО «Минскгражданпроект»), а также «Сосны» (РУП «БелНИИПП Градостроительства»);

– по проектированию пляжей на водохранилище «Дрозды» в районе пионерлагеря «Ракета» (ОАО «Минскгражданпроект»);

– по защите берега на территории базы отдыха на Браславском озере (ТМ АРК Архитектора А.П. Назарова);

– по проектированию берегозащитного волноустойчивого пляжа на Вилейском водохранилище, объект: «Реабилитационный центр «Надежда – XXI век» (ОАО «Минскгражданпроект»);

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования устойчивости береговых склонов, проводимые автором с 1976 г. по настоящее время на ряде водохранилищ страны позволили выявить фундаментальные закономерности, присущие формированию берегов водоемов искусственного происхождения, построенных в Беларуси. Причем, эти закономерности носят устойчивый характер и в значительной степени определяют динамику, масштабы и формы проявления берегового процесса. Подъем водохозяйственной отрасли, наметившийся в последние годы в стране, заставляет обратить внимание проектировщиков, эксплуатационщиков, а также специалистов высших учебных заведений, ведущих подготовку специалистов в области водохозяйственного строительства на береговые процессы, активно протекающие на водных объектах страны и инженерную защиту территорий. Настоящая работа, обобщающая многие специфические проблемы в области крепления берегов водохранилищ, подверженных активному формированию содержит в себе анализ существующих типов берегозащиты и крепления берегов, используемых в мировой практике и оценку применяемых способов крепления на водных объектах Беларуси. В работе показаны недостатки некоторых типов существующих видов креплений и рекомендуются новые способы, включающие использование новых технологий и материалов крепления. В монографии рассмотрен один из методических подходов по оценке экономической эффективности берегозащитных мероприятий.

Автор надеется, что представленные материалы по проблеме крепления берегов и откосов дамб и плотин с учетом научных основ формирования берегов водохранилищ Беларуси, основанных на результатах многолетних (более 50 лет) натурных и лабораторных исследований будут полезны для специалистов в области проектирования и эксплуатации водохозяйственных объектов не только нашей страны, но и сопредельных европейских государств, имеющих близкие географические, гидрологические и метеорологические условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главам 1, 2

1. *Левкевич, Е. М.* Исследование способов защиты берегов и верховых откосов земляных плотин креплением из крепноблочных элементов / Е. М. Левкевич, Н. В. Сурма // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1982. – №12. – С. 100–104.
2. *Левкевич, Е. М.* Мелкоячеистое покрытие грунтовых откосов / Е. М. Левкевич, Н. В. Сурма // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1986. – №15. – С. 97–101.
3. *Левкевич, В. Е.* Берегозащитные сооружения каскада водохранилищ Вилейско-Минской водной системы / В. Е. Левкевич // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2019. – № 1. – С. 48–58.
4. *Пышкин, Б. А.* Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин // Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.
5. *Шанкин, П. А.* Расчет покрытий откосов гидротехнических сооружений / П. А. Шанкин. – М.: Речной транспорт, 1961. – 292 с.
6. *Шайтан, В. С.* Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений / В. С. Шайтан. – М. : Стройиздат, 1974. – 352 с.
7. *Максимчук, В. Л.* Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев : Будівельник, 1981. – 112с.
8. *Зенкович, В. П.* Основы учения о развитии морских берегов / В. П. Зенкович. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 710 с.
9. *Кондратьев, В. Н.* Гидропосев трав при использовании агрегата для ухода за гидротехническими сооружениями / В. Н. Кондратьев / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т мелиорации. – Минск, 2010. – 28 с.
10. *Сокольников, Ю. Н.* Инженерная морфодинамика берегов и её приложения / Ю. Н. Сокольников. – Киев: Наукова думка, 1976. – 227 с.

11. *Цайтц, Е. С.* Действие волн на откос из несвязанных грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. С. Цайтц. – Киев, 1958. – 21 с.

12. *Канарский, В. С.* Устойчивость и прочность откосов земляных сооружений / В. С. Канарский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 146 с.

13. *Левкевич, В. Е.* Гидро – морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2018. – 143 с.

14. *Левкевич, В. Е.* Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ / V. E. Levkevich. – Latvia, LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 150 s.

15. *Левкевич, В.Е.* Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.

К главе 3

1. *Левкевич, Е. М.* Исследование пологих неукрепленных откосов земляных плотин и дамб на водоёмах БССР / Е. М. Левкевич, В. Н. Юхновец // Респ. межвед. сборник. – Вып. 6. – Мн. : Выш. школа, 1976. – С. 70–76.

2. *Левкевич, Е. М.* Из опыта эксплуатации креплений верховых откосов земляных плотин и берегов водохранилищ БССР/ Е. М. Левкевич, Г. П. Сапожников // Респ. межвед. сборник. – Вып. 7. – Мн. : Выш. школа, 1977. – С. 97–105.

3. *Левкевич, Е. М.* О деформации верховых откосов дамб рыбоводных прудов под действием волн в условиях БССР / Е. М. Левкевич // Проблемы мелиорации Полесья. – Минск, 1970. – Ч. 2. – С. 52–56.

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. *Сундук, В. М.* Методы борьбы с разрушениями гидротехнических сооружений от ветровых волн на прудах и

водоемах Мордовской республики / В. М. Сундуков. – Саранск, 1959. – 44 с.

6. *Ленартович, Е. С.* Расчет креплений берегов и дамб на малых водоемах / Е. С. Ленартович. – Елгава, 1977. – С. 109–116.

7. *Сегаль, Г. Я.* Указания по проектированию, строительству и эксплуатации низконапорных дамб из торфоминеральных смесей на торфяных основаниях / Г. Я. Сегаль. – Рига : ЛатвНИИГиМ, 1967. – 46 с.

8. *Левкевич, В. Е.* Опыт эксплуатации берегозащитных сооружений в Белоруссии / В. Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. – М., 1991. – № 5. – С. 66–74.

9. *Левкевич, В. Е.* Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.

10. *Левкевич В. Е.* Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.

11. *Бузук, А. В.* Критерий устойчивости откосов подпорных сооружений и берегов водохранилищ с деформированным железобетонным креплением/ А. В. Бузук // Мелиорация – 2018.– № 4 (86). – С. 24–30.

12. *Максимчук, В.Л.* Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев: Будівельник, 1981. –112 с.

13. *Шанкин, П. А.* Расчет покрытий откосов гидротехнических сооружений / П. А. Шанкин. – М. : Речной транспорт, 1961. – 292 с.

14. *Канарский, В. С.* Устойчивость и прочность откосов земляных сооружений / В. С. Канарский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 146 с.

15. *Пышкин, Б. А.* Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин. – Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.

16. *Левкевич, В.Е.* Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2018. – 143 с.

17. *Левкевич, В. Е.* Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ / V. E. Levkevich. – Latvia, LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 150 s.

18. *Левкевич, В.Е.* Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.

19. *Левкевич, Е. М.* Проектирование поперечного профиля земляных плотин и напорных дамб с уположенными и пологими верховыми откосами / Е. М. Левкевич. – Минск : БГПА, 1994. – 30 с.

20. *Плакида, М. Э.* Оградительные сооружения при транспортном освоении водохранилищ / М. Э. Плакида // Вопросы гидротехники : сб. тр. ЦНИИЭВТ. – М., 1958. – Вып. 15. – С. 49–63.

21. *Шайтан, В. С.* Проектирование креплений земляных откосов на водохранилищах / В. С. Шайтан. – М.: Госстройиздат, 1962. – 215 с.

22. *Шайтан, В. С.* Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений / В. С. Шайтан. – М.: Стройиздат, 1974. – 352 с.

23. *Алперин, И. Е.* Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ / И. Е. Алперин, П. С. Быков, В. Б. Гуревич. – М. : Транспорт, 1973. – 216 с.

24. *Левкевич В. Е.* Методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич, А. А. Новиков, А. В. Бузук // КИИ МЧС Республики Беларусь. – Мн.: КИИ МЧС РБ – 2015.– 55с.

25. *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.

26. *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, № 5, Минск, 2013. – С. 34–39.

27. *Левкевич, В. Е.* Берегозащитные сооружения каскада водохранилищ Вилейско – Минской водной системы / В. Е. Левкевич // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2019. – № 1 – С. 48-58.

28. *Кобяк, В. В.* Прогноз абразионных процессов на водохранилищах с трансформированным уровенным режимом: автореф. ...дис. канд. техн. наук : 05.23.07 / В. В. Кобяк; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2013. – 22 с.

К главе 4

1. *Пышкин, Б. А.* Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин. – / Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.

2. *Рагозин, А. Л.* Метод прогнозной экспресс-оценки интенсивности переработки берегов водохранилищ / А. Л. Рагозин, В. Н. Бурова // Гидротехническое строительство. – 1993. – № 10. – С. 20–26.

3. *Левкевич, В. Е.* Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.

4. *Левкевич В. Е.* Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси: / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.

5. Рекомендации по прогнозированию переработки абразионных берегов малых равнинных водохранилищ, сложенных несвязными грунтами. – Мн. : ротапонт ЦНИИКИВР, 1984. – 40 с.

6. *Левкевич, В. Е.* Методические рекомендации по прогнозированию деформации (переработки) берегов проектируемых и находящихся в эксплуатации водохранилищ Беларуси методом природных аналогов /В.Е. Левкевич, В. В. Кобяк. – Минск : Право и экономика, 2011. – 46 с.

7. *Максимчук, В. Л.* Рациональное использование и охрана на берегов водохранилищ. – Киев : Будівельник, 1981. –112 с.

К главе 5

1. *Левкевич, Е. М.* Проектирование поперечного профиля земляных плотин и напорных дамб с уположенными и пологими верховыми откосами / Е. М. Левкевич. – Минск: БГПА, 1994. – 30 с.
2. *Левкевич, В. Е.* Устойчивость берегозащитных и берегоукрепительных сооружений водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2019. – 160 с.
3. *Левкевич, В. Е.* Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2018. – 143 с.
4. *Левкевич, В. Е.* Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ / V. E. Levkevich. – Latvia, LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 150s.
5. *Левкевич, В. Е.* Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.
6. *Максимчук, В. Л.* Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев : Будівельник, 1981. – 112 с.
7. *Левкевич Е. М.* Исследование пологих неукрепленных откосов земляных плотин и дамб на водоёмах СССР / Е. М. Левкевич, В. Н. Юхновец //Респ.межвед. сборник. – Вып. 6. – Мн. : Выш. школа, 1976. – С. 70–76.
8. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП 45-3.04-170-2009(02250).– Минск: Минстройархитектуры, 2011. – 74с.
9. Справочник по климату Беларуси / М. А. Гольберг [и др.]; под общ. ред. М. А. Гольберга. – Минск: БЕЛНИЦ ЭКОЛОГИЯ, 2003. – Ч. 4. Ветер. Атмосферное давление. – 124 с.

К главе 6

1. *Левкевич, В. Е.* Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2015. – 307 с.

2. *Левкевич, В. Е.* Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.

3. *Левкевич, В. Е.* Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2018. – 143 с.

4. *Матвеев, А. В.* Современная динамика рельефа Белоруссии /А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, А. И. Павловский и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 102 с.

5. *Левкевич, В. Е.* Оценка влияния процессов переработки береговых склонов на возникновении гидродинамических аварий / В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, В. В. Кобяк // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6-8 июня 2007г. / НИИ ПБиЧС МЧС Респ. Беларусь; редкол.: Э.Р.Бариев [и др.]. – Минск, 2007. – С. 160–166.

6. Климат Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] / НАН Беларуси, Ин-т геол. наук ; под общ. ред. В. Ф. Логинова. – Минск, 1996. – 235 с.

К главе 7

1. Методические рекомендации по проектированию крепления откосов земляных гидротехнических сооружений, подверженных действию ветровых волн. – Л. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1972 .

2. *Круглов, Г. Г.* Методическое пособие к курсовому проекту «Плотина из грунтовых материалов» по курсу «Гидротехнические сооружения» для студентов специальности 29.04. – Мн/ : БПИ, 1990.

3. Гидротехнические сооружения: Учебник для студентов вузов / Под ред. М. М. Гришина. – В 2 ч. - 4.1. – М. : Высш. школа. 1976.

4. *Кирьянко, И. И.* Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет. – Киев: Высшая школа, 1987.

5. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика / Г. В. Железняков, Ю. А. Ибад-Заде, П. Л. Иванов и др.; Под общей ред. В. П. Недриги. – М. : Стройиздат, 1983.

6. *Богославчик, П. М.* Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов: учебное пособие / П. М. Богославчик [и др.]; под ред. Г. Г. Круглова. – Мн.:БНТУ 2006. – 585с.

7. *Ларьков, В. В.* Гидротехнические водоохранные сооружения / В. В. Ларьков, Э.И.Михневич и др.; под общ. ред. В. М. Ларькова. – Горки : БГСХА, 2011. – 308 с.

8. *Снитков, В. А.* Защита откосов мелиоративных каналов и дамб от войной* и ветровой эрозии. - Мн. : Ураджай, 1984.

9. *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.

10. *Розанов, Н. Н.* Плотины из грунтовых материалов. –М. : Строймашиздат, 1983.

11. *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.

12. *Левкевич, В. Е.* Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.

14. *Левкевич, В. Е.* Гидро–морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2018. – 143 с.

14. *Левкевич, В. Е.* Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ / В. Е. Левкевич. – Latvia, LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 150s.

15. *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, №5, Минск, 2013. – С.34–39.

16. *Михневич, Э. И.* Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия / Э.И.Михневич // Наука и техника – 2018 – № 2. – С. 100–105.

17. *Бузук, А. В.* Критерий устойчивости откосов подпорных сооружений и берегов водохранилищ с деформированным железобетонным креплением/ А. В. Бузук // Мелиорация – 2018. – №4(86). – С.24– 30.

К главе 8

1. *Кантаржи, И. Г.* Накат волн на проницаемые закрепленные откосы / И. Г. Кантаржи, С. Л. Кивва, Н. В. Шунько // Инженерно-строительный журнал М., - 2014. - №6 – С.13–23.

2. *Левкевич, В. Е.* Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси /В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2015. – 307 с.

3. *Левкевич, В. Е.* Гидро – морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2018. – 143 с.

4. Методические рекомендации по проектированию крепления откосов земляных гидротехнических сооружений, подверженны действию ветровых волн. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1972 .

5. *Левкевич, В. Е.* Оценка влияния процессов переработки береговых склонов на возникновении гидродинамических аварий / В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, В. В. Кобяк // Чрезвы-

чайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. докл. Международ. науч. – практ. конф., Минск, 6–8 июня 2007г. / НИИ ПБиЧС МЧС Респ. Беларусь; редкол.: Э. Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2007. – С. 160–166.

6. *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, № 5, Минск, 2013. – С.34–39.

7. *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.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ И БЕРЕГУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ	5
Глава 2 УСТОЙЧИВОСТЬ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВ И СООРУЖЕНИЙ БЕРЕГОЗАЩИТЫ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	36
2.1. <i>Исследования устойчивости креплений берегов и откосов на водохранилищах страны. Краткий исторический очерк</i>	35
2.2. <i>Берегозащитные сооружения и крепления , используемые на водохранилищах республики</i>	45
Глава 3 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СОСТОЯНИЕ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВ И ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ПОДПОРНЫХ И ОГРАЖДАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ.....	59
Глава 4 ПРОГНОЗЫ ДЕФОРМАЦИЙ БЕРЕГОВ И ВЕРХОВЫХ ОТКО- СОВ СООРУЖЕНИЙ, ТРЕБУЮЩИХ КРЕПЛЕНИЯ.....	72
Глава 5 РАСЧЕТ ЗАЛОЖЕНИЙ ГРУНТОВЫХ НЕЗАКРЕПЛЕННЫХ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ДАМБ И ПЛОТИН С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ	102
5.1. <i>Определение заложения верховых грунтовых откосов</i>	102
5.2. <i>Расчёт возможных деформаций незакреплённых верхо- вых откосов земляных гидротехнических сооружений.....</i>	111

Глава 6

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРИМЕНЕНИЯ КРЕПЛЕНИЙ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ ПОЛЕСЬЯ	116
---	-----

Глава 7

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОХРАНИЛИЩ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КРЕПЛЕНИЙ КОСОВ И БЕРЕГОВ	126
7.1. Расчет креплений верховых откосов	126
7.2. Критерии устойчивости откосов, предназначенные для расчета креплений	131
7.3. Нарушение устойчивости креплений при их эксплуатации	137

Глава 8

НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВ И ОТКОСОВ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	142
8.1. Применение полимерных материалов и синтетических покрытий	142
8.2. Новые конструкции бетонных креплений	147
8.3. Инновационная технология берегозащиты, основанная на использовании эффекта сортировки неоднородного грунта	149
8.4. Оценка экономической эффективности применения новых типов креплений и берегозащиты	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	160

Научное издание

Левкевич Виктор Евгеньевич

**КРЕПЛЕНИЕ БЕРЕГОВ И ВЕРХОВЫХ
ОТКОСОВ ПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ГИДРОУЗЛОВ БЕЛАРУСИ**

В авторской редакции

Подписано в печать 13.11.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 10,00. Уч.-изд. л. 7,82. Тираж 100. Заказ 767.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.