

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права  
УДК 627.5:627.81(476)

**БУЗУК**  
**Александр Вячеславович**

**УСТОЙЧИВОСТЬ КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН  
И БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.07 – гидротехническое и мелиоративное строительство

Минск, 2024

Научная работа выполнена в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Научный руководитель:

**ЛЕВКЕВИЧ Виктор Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

**ВОЙТОВ Игорь Витальевич**, доктор технических наук, профессор, ректор учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

**БОГОСЛАВЧИК Петр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет» г. Брест

Защита состоится 27 июня 2024 года в 12.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202; телефон ученого секретаря +375 (17) 292-77-83.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета (г. Минск, ул. Я. Коласа, 16).

Автореферат разослан 23 мая 2024 года.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.05.10  
доктор технических наук, профессор



П.И. Дячек

© Бузук А. В., 2024

© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь водохранилища широко используются в целях мелиорации, рекреации, регулирования поверхностного и речного стока, рыбного хозяйства, технического и питьевого водоснабжения, а также для энергетических нужд. На данный момент в стране насчитывается порядка 160 водохранилищ различного типа с общей площадью около 2500 км<sup>2</sup> и объемом 10 км<sup>3</sup>. Протяженность береговой линии всех водохранилищ республики составляет более 1500 км, а протяженность защищаемых различными типами креплений откосов – более 250 км.

Основными вопросами при решении проблемы безаварийной эксплуатации гидроузлов, подпорных сооружений и водохранилищ являются: оценка состояния и прогнозирование устойчивости берегоукреплений под действием сочетания различных факторов и воздействующих нагрузок, определяющих безопасную эксплуатацию сооружений и принятие эффективных технико-экономических решений при ликвидации последствий аварийных ситуаций [9].

В современной практике применения берегозащиты откосов дамб, плотин и естественных берегов имеют место различные типы креплений. В настоящей работе рассматривался только пассивный тип берегозащитных сооружений как наиболее распространенный в условиях водохранилищ Беларуси (более 80 %), представленный креплением верховых откосов дамб, плотин и берегов монолитными и сборно-монолитными железобетонными плитами с поврежденной заделкой швов. Поэтому разработка *методики расчета устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси с учетом возможных деформаций подстилающего грунтового откоса* при воздействии ветрового волнения, колебания уровней, вдольбереговых (ветроволновых и стоковых) течений позволяет определить мероприятия, обеспечивающие эффективную защиту конструкций и функционирование креплений, а также продлить срок безаварийной эксплуатации сооружения, что является важным и актуальным.

Установлено, что общая протяженность берегоукрепления «пассивного» типа в стране составляет около 180 км, из них около 55 % имеют повреждения и находятся в неудовлетворительном состоянии. На основании анализа проведенных натурных исследований определено, что повсеместно присутствуют следующие *деформаций креплений*: разрушение межплитных швов (строительных, температурных, осадочных, *расположенных в большинстве случаев по нормали к урезу воды*) с выносом грунта и обратного фильтра из-под плит крепления, что ведет к потере местной и общей устойчивости сооружения – 75 % случаев; деформации поверхности бетонных креплений, арматуры, защитного слоя, которые ведут к обрушению верховых откосов земляных дамб и плотин – около 22 % случаев и прочих повреждений – 3 % случаев. В настоящем исследовании рассматривается только случай раскрытия и деформации заполнения швов как наиболее распространенная причина потери устойчивости берегоукрепительных сооружений.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Исследования, составившие основу диссертационной работы, выполнялись в государственном учреждении образования «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь, правопреемником которого является Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, в рамках государственной программы прикладных научных исследований «Снижение рисков ЧС» (на 2006–2009 годы) «Разработка методики оценки и прогнозирования ущербов от ЧС и определение показателей риска. Районирование территории страны по абразивному риску и ущербам» № ГР 20065526; государственной программы прикладных исследований «Снижение рисков ЧС» (на 2009–2010 годы) «Разработка методики и алгоритмов прогнозных расчетов переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при техногенных чрезвычайных ситуациях на основе геоинформационных технологий» № ГР 20091268; государственной программы научных исследований «Научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» (на 2010–2015 годы) «Разработать базу данных тестовых искусственных водных объектов Республики Беларусь для прогнозирования возможных аварий на гидротехнических сооружениях с учетом их современного состояния» № ГР 20121924; государственной программы научных исследований «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» (на 2010–2015 годы) «Исследование устойчивости ограждающих гидротехнических сооружений шламохранилищ и прудов накопителей мелиоративных и польдерных систем для предупреждения чрезвычайных ситуаций и оценки возможных ущербов» № ГР 20140928; государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность» (2015–2020 годы), задание «Оценить состояние гидротехнических сооружений на водоемах технического назначения с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций» № ГР 20163549 и задание «Оценить влияние береговых и русловых процессов на устойчивость берегов судоходных рек и каналов с целью прогнозирования возникновения гидродинамических аварий» № ГР 20200868.

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Цель работы – разработать методы оценки устойчивости креплений откосов дамб, земляных плотин и берегов водохранилищ для повышения эффективности берегоукрепления и надежности работы сооружений.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработана методика экспериментальных натурных и лабораторных исследований устойчивости креплений берегов, откосов дамб и плотин искусственных водных объектов.
2. Выполнены экспериментальные натурные исследования и систематизированы случаи и варианты потери устойчивости и разрушения креплений вер-

ховых откосов дамб и плотин при комбинированном воздействии волнения, колебания уровней воды в водохранилище и фильтрационных сил.

3. Проведен численный эксперимент распределения стоковых течений в русловых водохранилищах и моделирование процесса потери устойчивости креплений берегов, подверженных деформации, в том числе с нарушенным заполнением швов, при воздействии уровенного режима водохранилища и волнения с различными диапазонами уровней и высот волн в верхнем бьефе.

4. Предложен критерий устойчивости откосов земляных плотин и берегов водохранилищ, в том числе с берегозащитными сооружениями, учитывающий параметры ветрового волнения, колебания уровня верхнего бьефа, зависящие от назначения водоема и условий эксплуатации.

5. Разработана структура и форма базы данных по оценке состояния водохранилищ Беларуси, сооружений инженерной защиты и гидротехнических сооружений.

6. Разработаны «Методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верхних откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси» (2-е изд. перераб. и доп.) [42] для оперативной оценки на стадии проектирования принимаемых проектных решений по выбору варианта плит крепления в результате учета критерия  $P_k$ .

Объект исследования – искусственные водные объекты и сооружения берегозащиты Республики Беларусь.

Предмет исследования – устойчивость берегоукрепительных сооружений и динамика береговых процессов на искусственных водных объектах при воздействии волн и колебания уровней воды.

### **Научная новизна**

Разработаны схемы разрушения, изучен механизм нарушения устойчивости плит крепления при потере общей устойчивости откосов. По результатам лабораторных исследований получено распределение волновых нагрузок на поверхностях плит крепления, обращенных в сторону водохранилища, тела дамбы или плотины. Получены данные по выносу грунта из-под плит крепления при волновом воздействии, что позволило автору научно обосновать для оценки общей устойчивости откосов и плит креплений критерий устойчивости  $P_k$ , зависящий от соотношения сил, действующих на них. Разработаны база данных и методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верхних откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных натурных и лабораторных исследований устойчивости креплений береговых склонов водохранилищ, верхних откосов дамб и плотин, а также механизм разрушения оснований креплений при совместном волновом воздействии и изменении уровня верхнего бьефа (колебание уровней).

2. Критерий устойчивости  $P_k$ , определяющий стадию развития деформаций креплений и общую устойчивость откосов и позволяющий оценить устойчивость откоса, покрытого плитами с нарушенной структурой, а также откоса,

принявшего контур профиля динамического равновесия в данных грунтовых условиях.

3. Методика оценки устойчивости креплений верховых откосов дамб и плотин и берегозащитных сооружений на водохранилищах, учитывающая комплексное взаимодействие откософормирующих факторов и условий, в которой учтен критерий устойчивости  $L_c$ .

### **Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций**

Самостоятельно выполнены работы по разработке и подготовке к экспериментам на моделях креплений откосов напорных сооружений и берегов, инструментальные замеры результатов экспериментов, обработка и анализ результатов испытаний, теоретические исследования механизма разрушения берегозащитных сооружений. Цель и задачи исследований сформулированы совместно с научным руководителем – д-р техн. наук В. Е. Левкевичем. Совместно с канд. техн. наук В. В. Кобяком, канд. геогр. наук М. С. Кукшиновым и научным руководителем проведены экспериментальные натурные исследования. Совместно с д-ром техн. наук В. Е. Левкевичем проведены натурные и лабораторные исследования устойчивости плит креплений. Совместно с канд. техн. наук А. А. Новиковым проведено моделирование режима стоковых течений на основе программных средств для оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений. Автор диссертации выражает благодарность за консультационную помощь Э. И. Михневичу, А. В. Ильющонку и С. М. Пастухову.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции «Проблемы водоснабжения и водоотведения и энергосбережения в западном регионе республике Беларусь» (Брест, 2010); IV Международном водном форуме «Стратегические проблемы охраны и использования водных ресурсов» (Минск, 2010); IX Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2011); VI Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (Минск, 2011); IV Международной научной конференции «Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды» (Минск, 2011 г.); Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации» (Гомель, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций» (Минск, 2013); Международных научно-практических конференциях МГУ (Москва, 2013, 2019); Международной научно-практических конференциях БНТУ (Минск, 2014, 2015, 2020); Международной научной конференции «Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии. TASECO – 2018» (Ташкент, 2018); Международной научной конференции «Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии.

TASECO – 2020» (Ташкент, 2020); Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков «ГЕ-ОРИСК-2018» (Москва, 2018); V Международной научно-практической конференции «Гришанинские чтения – «Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей» (Санкт-Петербург, 2021).

Результаты исследований внедрены в производство и позволили получить экономический эффект в размере 594,14 млн руб. в ценах на ноябрь 2015 г. на строящемся водохранилище Витебской ГЭС в рамках Строительного проекта объекта № 121: «Строительство Витебской ГЭС на р. Западная Двина. Мероприятия по ложу водохранилища» (разработчик РУП «Белгипроводхоз»); по объекту «Строительство Хотомельского перепуска Столинского района Брестской области (разработчик РУП «Белгипроводхоз») экономический эффект в объеме 1,07 млрд руб. в текущих ценах на ноябрь 2015 г. Кроме того, предложения автора использованы при реконструкции карьера ОАО «Доломит» в образовательном процессе Университета гражданской защиты и по объекту «Производство расчетов по осадке торфяной залежи площадью около 140 га на объекте «Строительство жилой застройки с объектами инфраструктуры в районе аг. Ратомка Ждановичского сельсовета Минского района» (Институт природопользования НАН Беларуси), что позволило получить экономический эффект в размере 6,53 млн руб.

#### **Опубликованность результатов диссертации с указанием количества публикаций по теме диссертации и их объема в авторских листах**

Основные положения диссертации опубликованы в 42 печатных работах, в том числе: 7 статей, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 5,4 авторского листа, 34 статьях рецензируемых изданиях и тезисах докладов в сборниках научных трудов международных конференций и семинаров общим объемом 6,7 авторского листа (из них без соавторов 4 статьи), 1 методические рекомендации.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка из 150 наименований, включая собственные публикации, 6 приложений, 36 рисунков и 25 таблиц. Полный объем диссертации составляет 158 страниц. Объем, занимаемый иллюстрациями, таблицами, приложениями, составляет 76 страниц.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена анализу водохранилищного фонда Республики Беларусь, а также аналитическому обзору литературы по оценке устойчивости берегоукрепительных сооружений и сооружений берегозащиты при возникновении чрезвычайных ситуаций на искусственных водных объектах.

Определено, что на водохранилищах Беларуси наиболее часто применяются крепления верховых откосов подпорных сооружений и берегов «пассивно-

го» типа, к которым относятся железобетонные плиты различных форм и конструктивных особенностей, определяемых номенклатурой выпускаемых изделий для мелиорации и водного хозяйства. Большинство сооружений берегозащиты, как показали натурные обследования ряда водохранилищ, имеют срок эксплуатации до 45–55 лет и требуют капитального ремонта, иначе их дальнейшее использование создает угрозу разрушения и возникновения чрезвычайных ситуаций (рисунк 1).



**а – разрушение крепления откоса плотины; б – авария водосброса**

**Рисунок 1 – Млынокское водохранилище, Гомельская область**

Источник – Собственные фото автора.

В настоящее время полномасштабные исследования устойчивости сооружений и элементов берегоукрепительных сооружений водохранилищ проводятся в: Институте водных проблем РАН, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, Государственном гидрологическом институте, ЗАО «ДАР/ВОДГЕО», ПНИИИС Госстроя России и др. Наиболее известными исследователями в области устойчивости и крепления откосов являются: Б. А. Пышкин, В. С. Шайтан, Н. Н. Джунковский, Ю. А. Сокольников, И. Н. Крыжановская, Е. С. Цайтц, В. Ф. Канарский, Е. М. Левкевич, Д. П. Финаров, В. Г. Рыбка, В. В. Лонгинов, Ю. А. Соболевский, В. Н. Кондратьев, Э. И. Михневич и др., однако они рассматривали проблему исходя из региональных условий, специфики и масштабов водных объектов.

Установлено, что устойчивость креплений откосов следует рассматривать во взаимосвязи с процессом формирования профиля динамического равновесия грунтового откоса. Поэтому в работе учитывались работы ученых-береговиков: Н. Е. Кондратьева, Е. Г. Качугина, В. Л. Максимчука, А. Л. Рагозина, Г. С. Золотарева, Л. Б. Розовского, Л. Б. Иконникова, А. А. Печеркина, П. С. Лопуха, Е. С. Ленартович, Ф. В. Саплукова, В. М. Широкова, В. Е. Левкевича и др.

Одной из основных причин нарушения устойчивости берегоукрепления, как показали наблюдения и анализ литературных данных [10; 11; 12; 14], является совместное воздействие гидрологических факторов (ветрового волнения, течений, колебаний уровней, ледовый режим, влияние фильтрационных процессов) на верховые откосы дамб, плотин и берега с креплением плитами при

различных положениях уровня верхнего бьефа, которое комплексно до настоящего времени не учитывалось при оценке устойчивости сооружений откосного типа.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи диссертационных исследований.

**Во второй главе** проведена оценка условий устойчивости берегозащитных сооружений и анализ сил, действующих на элемент грунта, находящегося на откосе при раскрытии швов крепления в случае ската волны к основанию откоса.

При проведении натуральных обследований водохранилищ установлено, что в период эксплуатации берегозащитных сооружений происходит разрушение швов (строительных, температурных осадочных) между ними, что ведет к переработке тела грунтового сооружения, выносу песчано-гравелистой подготовки и грунта из-под крепления, просадке и в итоге – к разрушению берегоукрепления.

На защищенные верховые откосы дамб и плотин и коренные берега действуют различные сочетания сил, вызванных воздействием берегообразующих факторов (волнения, течений, колебаний уровней и т. д.). При наличии берегозащитных сооружений береговой склон не подвергается прямому волновому воздействию [9], однако с течением времени в результате нарушения целостности плит и швов возникает прямой контакт подплиточного пространства с водной средой. Это процесс наблюдается через 4–5 лет после начала эксплуатации подпорных сооружений и креплений и продолжается до выработки в подплиточном пространстве каверны, имеющей контур, близкий к профилю динамического равновесия. На этой стадии, как правило, происходит разрушение крепления, что может привести к потере устойчивости подпорного сооружения и возникновению чрезвычайной ситуации (Млынокское водохранилище, Ельский район Гомельской области).

Анализ деформации креплений гидротехнических сооружений позволил установить, что наиболее характерными повреждениями берегоукрепительных сооружений являются разрушения швов (осадочных, температурных, монтажных), что сопряжено с выносом из тела сооружения грунта песчано-гравийной подготовки – обратного фильтра, просадкой плит, появлением трещин и разломов, причинами которых являются низкое качество строительно-монтажных работ, плохая подготовка креплений, некачественное исполнение швов, отклонения в технологии строительства, ошибки при проектировании.

Натурными исследованиями определены три типа разрушения крепления:

- 1) характеризуется разрушением межплиточных швов в результате воздействия комбинированных нагрузок (волнение, колебание уровней и т. д.);
- 2) определяется вымывом грунта подготовки через межплиточные швы;
- 3) сопровождается выносом грунта и материала подготовки из-под плит крепления.

Волновая взвешивающая сила, оказываемая на элемент грунта и плиты крепления взвешивающий эффект за счет возникающего градиента давления

фильтрационного потока, может проявляться исключительно в условиях естественных берегов при разгрузке фронта фильтрации на откос, что вызывает суффозионные процессы. При инфильтрации из водохранилища в береговой склон и через тело откосов дамб и плотин наблюдается эффект «прижимания» плиты к поверхности откоса, но его действие крайне незначительно и оно в расчетах не учитывалось.

Ледовые нагрузки могут оказывать определенное воздействие на поверхность крепления, однако в случае сработки уровня верхнего бьефа водохранилища в осенне-зимний период исключается активное воздействие льда на поверхность откоса, что в расчетах не учитывалось. Наблюдающиеся в последние годы глобальные изменения климата, в том числе и в Беларуси (В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, В. П. Рогунович), характеризуются короткой, теплой и бесснежной зимой, поэтому автором в дальнейшем рассматривался только безледный период.

При оценке устойчивости берегоукреплений рассматривались только те факторы, которые вызывают развитие деформации сооружений в безледный период года, который для Беларуси составляет апрель – ноябрь.

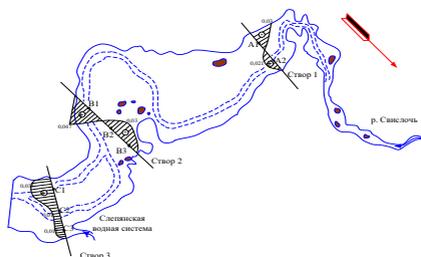
Для анализа устойчивости крепления откоса автором был научно обоснован и предложен критерий устойчивости берегозащитных сооружений –  $P_k$ , учитывающий гидрологический режим водохранилища (волнение и колебания уровней в верхнем бьефе), параметры заложения откоса, характеристики механического состава размываемых грунтов под плитами. Критерий устойчивости  $P_k$  в общем виде будет зависеть от: силы тяжести элемента грунта; силы, создаваемой поверхностным потоком при откате волны (учитывающей площадь элемента грунта, удельный вес воды, скорость поверхностного потока, коэффициент воздействия скоростного напора на элемент грунта); волновой взвешивающей силы с коэффициентом взвешивающего волнового давления для зернистых материалов и сплошного крепления; удерживающая составляющая силы тяжести; сдвигающая составляющая силы тяжести.

По материалам натурных обследований креплений откосов была разработана карта районирования территории Беларуси по фактическому состоянию берегозащитных сооружений на эксплуатируемых водохранилищах (в том числе с бетонным и железобетонным креплением откосов), а также база данных существующих сооружений инженерной защиты, которая включает сведения, полученные автором более чем по 105 искусственным водным объектам страны в результате натурных обследований [13; 34].

**В третьей главе** приведены результаты натуральных и лабораторных исследований влияния воздействия на устойчивость крепления откосов дамб, плотин и незащищенных берегов и развитие абразионных процессов внутриводоемных стоковых и вдольбереговых течений, а также их численного моделирования [21; 25; 33; 37].

Натурные исследования внутриводоемных течений выполнялось на тестовых водохранилищах руслового типа, являющихся характерными для условий страны и имеющих наибольшее распространение. Были выбраны водохрани-

лица, находящиеся в каскаде Вилейско-Минской водной системы: Криницы, Дрозды и Чижовское. Поверхностные (ветро-волновые) течения в зависимости от направления ветра могут совпадать или не совпадать со стоковыми, направленными всегда в сторону водосброса, при этом натурными исследованиями было установлено, что толщина слоя воды, охватываемого поверхностным течением, достигает 0,5 площади сечения водохранилища в створе измерений, а скорость течения составляет 0,3–0,4 см/с (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Распределение скоростей течений по акватории Чижовского водохранилища**

Источник – Разработка автора на основе собственных натуральных обследований.

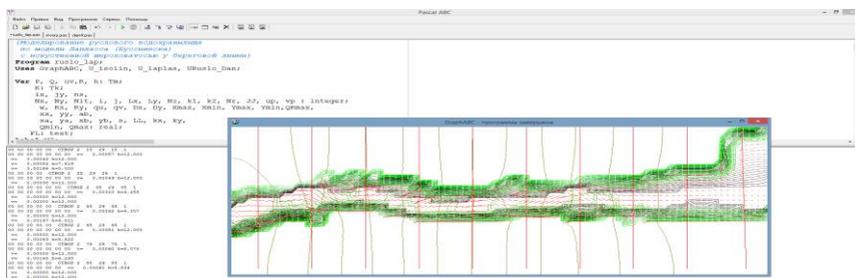
Натурные многолетние обследования показали, что в условиях русловых водохранилищ, имеющих вытянутую форму, внутриводоемные и вдольбереговые течения при совместном действии в прибрежной зоне могут ускорить процесс разрушения креплений откосов, а также способствуют выносу и транспортировке материала переработки из-под плит крепления.

Лабораторные исследования стоковых течений водохранилищ, а также распределения скоростей в водоемах проводилось в гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета в большом русловом лотке на жестких неразмываемых моделях каскада водохранилищ Вилейско-Минской водной системы, имеющих следующий масштаб: вертикальный – 1:100 и горизонтальный – 1:1000. Моделирование стоковых течений осуществлялось на неразмываемых моделях путем пропуска установившегося расхода воды. Регистрации скоростей стоковых течений и распределение поля скоростей по акватории моделей водохранилищ осуществлялась постворно с использованием маркера (красителя) и микрокомпьютерного расходомера-скоростемера, который позволял получать осредненные значения скоростей течений в потоке.

Лабораторные исследования на моделях тестовых водохранилищ по распределению продольных скоростей по створам позволили получить сведения о распределении скоростей по акватории водоемов и концентраций местах линий тока. Данные лабораторных исследований были подтверждены натурными обследованиями побережья тестовых водоемов и в местах расчетных и смоделированных повышенных концентраций линий тока, ведущих к деформациям

откосов дамб (водохранилище Криницы, правый берег; водохранилище Дрозды, левый берег), а также незащищенных берегов (Чижовское водохранилище).

Для оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений было выполнено численное моделирование движения воды как в тестовых водоемах на основе использования, разработанной имитационной модели внутриводоемных течений совместно с к.т.н. А. А. Новиковым [2; 6; 7; 11; 19; 24; 30; 31], так и на проектируемом водохранилище Витебской ГЭС. Сравнение полученных результатов расчетов, визуализированных в виде карты распределения поля скоростей внутриводоемных течений (рисунок 3), с экспериментальными данными в лабораторных и натурных условиях показало удовлетворительную сходимость (12–15 %). Проведенный автором численный эксперимент на основе математического моделирования распределения скоростей течений по тестовым водохранилищам подтвердил факт зависимости участков разрушения и потери устойчивости плит крепления от сочетания внутриводоемных и вдольбереговых течений.

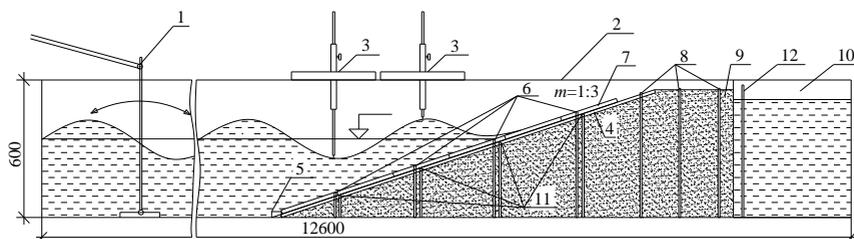


**Рисунок 3 – Распределение скоростей и напоров на участке водохранилища Витебская ГЭС у садового товарищества «Судоостроитель» (правый берег)**  
Источник – Разработка автора на основе исследования А. А. Новикова.

Проведенное математическое моделирование распределения скоростей течений по водохранилищам подтвердило факт прямой связи разрушения и потери устойчивости плит крепления от наличия внутриводоемных и вдольбереговых течений. Кроме того, установлено что в русловых водохранилищах, имеющих коэффициент удлиненности  $K_{уд}$  до 24,0, где ветровое волнение не является определяющим фактором при разрушении склонов и креплений, рекомендуется для укрупненного прогноза устойчивости сооружений и креплений откосов использовать метод численного моделирования распределения скоростей течений.

**Четвертая глава** посвящена лабораторному исследованию устойчивости откосов и плит крепления, которое выполнялись в волновом лотке гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета. Методика исследований включала изучение влияния совместного воздействия волнения и изменения уровня режима на интенсивность и масштабы деформаций крепления откоса бетонными плитами.

Опытная установка включала (рисунок 4): волновой лоток с волнопродуктором (размерами – 12,6×0,6×0,3 м); емкости для моделирования фильтрации грунтовых вод (позиция 10); тело модели из среднезернистого песка с заложением верхового откоса  $m = 1:3$  (позиция 9); устройство обратного фильтра (позиция 4); защиту поверхности откоса модели берегоукрепительным сооружением в виде плиток размером 15×30×2 см (ширина раскрытия шва от 1,0 до 3,0 см) (позиция 7). В теле модели располагались: три пьезометра для определения фильтрационного давления (позиция 8); пьезометры для регистрации давления на поверхности модели в различных зонах трансформации волны (позиция 6) и в подплиточном пространстве (позиция 11); регистрации уровня воды мерной трубкой (позиция 12). Измерение высоты волны производилось при помощи мерных игл (рисунок 4, позиция 3).

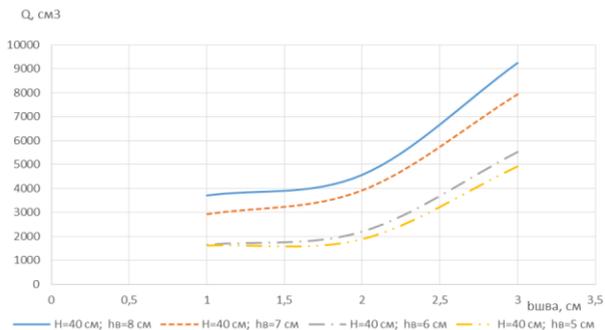


**Рисунок 4 – Схема лабораторной установки для исследования устойчивости крепления откосов подпорных сооружений**  
 Источник – Разработка автора на основе собственных исследований.

Эксперименты проводились при заданном уровне воды в лотке и определенной высоте волны, генерируемой волнопродуктором. Одновременно выполнялась фиксация пьезометрического давления на поверхности откоса, покрытого плитками, и в подплиточном пространстве в различных точках по откосу в различных зонах волнового потока. Фиксация величин линейных деформаций откоса и объема вынесенного грунта ( $L_t$  и  $h_t$ ) под плитками (при образовании подводной полости под берегоукреплением) проводилась в определенные промежутки времени. Всего было проведено 12 опытов в 5-кратной повторности. Моделирование осуществлялось в масштабе 1:10 в соответствии с критериями моделирования, принятыми по Фрудру (В. Л. Максимчук, Б. А. Пышкин).

Регистрация объема вымытого грунта в зависимости от ширины раскрытия шва ( $b_{шва}$ ) при различных глубинах и высотах волн проводилась при первых подвижках плит крепления откоса. Этим перемещениям предшествовала трансформация (переработка и вынос грунта) откоса из-под плит крепления откоса.

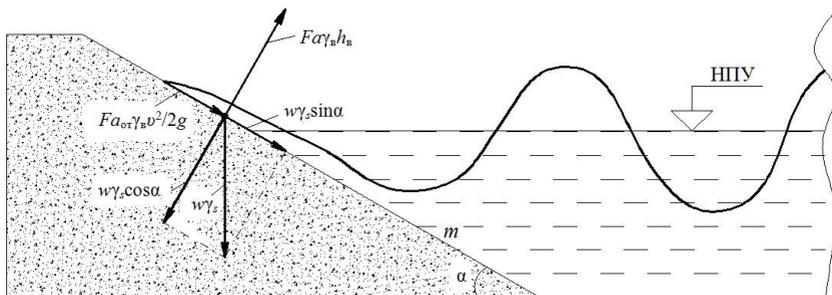
Ниже приведен график зависимости объема размыва откоса под плитками крепления от ширины шва  $Q_t = f(b_{шва})$ , полученный по данным лабораторных исследований (рисунок 5).



**Рисунок 5 – Зависимость объема вымытого грунта от ширины раскрытия шва**

Источник – Данные лабораторных исследований.

Для вывода формулы критерия устойчивости рассмотрена схема сил, действующих на элемент грунта на откосе при откате волны (рисунок 6).



**Рисунок 6 – Схема сил, действующих на элемент грунта на откосе при откате волны**

Источник – Разработка автора на основе собственных исследований.

На элемент грунта, расположенный на откосе под углом  $\alpha$  к горизонту, действуют следующие силы:

- сила тяжести элемента грунта  $w\gamma_s$ , где  $w$  – объем элемента грунта,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma_s$  – удельный вес частиц грунта,  $\text{Н}/\text{м}^3$ ;

- сила, создаваемая поверхностным потоком при откате волны,  $Fa_{от}\gamma_b v^2/2g$ , где  $F$  – площадь элемента грунта,  $\text{м}^2$ ;  $\gamma_b$  – удельный вес воды,  $\text{Н}/\text{м}^3$ ;  $v$  – скорость поверхностного потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $a_{от}$  – коэффициент воздействия скоростного напора на элемент грунта;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

- волновая взвешивающая сила  $Fa\gamma_b h_b$ , где  $h_b$  – расчетная высота волны,  $\text{м}$ ;  $a$  – коэффициент взвешивающего волнового давления;  $a = 0,27(1 - n_s)$  для зернистых материалов;  $a = 0,27$  для сплошного крепления;  $n_s$  – пористость грунта на откосе;

- удерживающая составляющая силы тяжести  $w\gamma_s \cos\alpha$ , Н/м<sup>3</sup>;
- сдвигающая составляющая силы тяжести  $w\gamma_s \sin\alpha$ , Н/м<sup>3</sup>.

Приравнивая сдвигающие и составляющие силы к массиву грунта, указанные на рисунке 6, с учетом коэффициента внутреннего трения грунта  $f$ , получим уравнение предельного равновесия в следующем виде:

$$w\gamma_s \sin\alpha + \frac{Fa_{от}\gamma_B v^2}{2g} = (w\gamma_s \cos\alpha - Fa\gamma_B h_B) f. \quad (1)$$

Разделив левую и правую части уравнения (1) на  $F\sin\alpha$ , получим:

$$d\gamma_s + \frac{a_{от}\gamma_B v^2 \sqrt{1+m^2}}{2g} + a\gamma_B h_B f \sqrt{1+m^2} = d\gamma_s m f, \quad (2)$$

где  $d = w/F$  – диаметр частиц грунта, м;  $m = \operatorname{ctg}\alpha$  – коэффициент заложения откоса;  $1/\sin\alpha = \sqrt{1+m^2}$  – угол наклона откоса к горизонту при заданном коэффициенте заложения откоса  $m$ .

Разделив уравнение (2) на  $d g \rho_B$ , получим:

$$\frac{\rho_s}{\rho_B} + \frac{a_{от} v^2 \sqrt{1+m^2}}{2gd} + \frac{ah_B f \sqrt{1+m^2}}{d} = \frac{\rho_s m f}{\rho_B}, \quad (3)$$

где  $\rho_s$ ,  $\rho_B$  – плотность соответственно частиц грунта и воды, кг/м<sup>3</sup>.

Обозначим отношение  $\rho_s/\rho_B = \rho'_s$  (относительная плотность частиц грунта) и умножим уравнение (3) на  $d$ , тогда после преобразований уравнение (3) примет следующий вид:

$$\left( \frac{a_{от} v^2}{2g} + ah_B f \right) \sqrt{1+m^2} = \rho'_s (mf - 1) d. \quad (4)$$

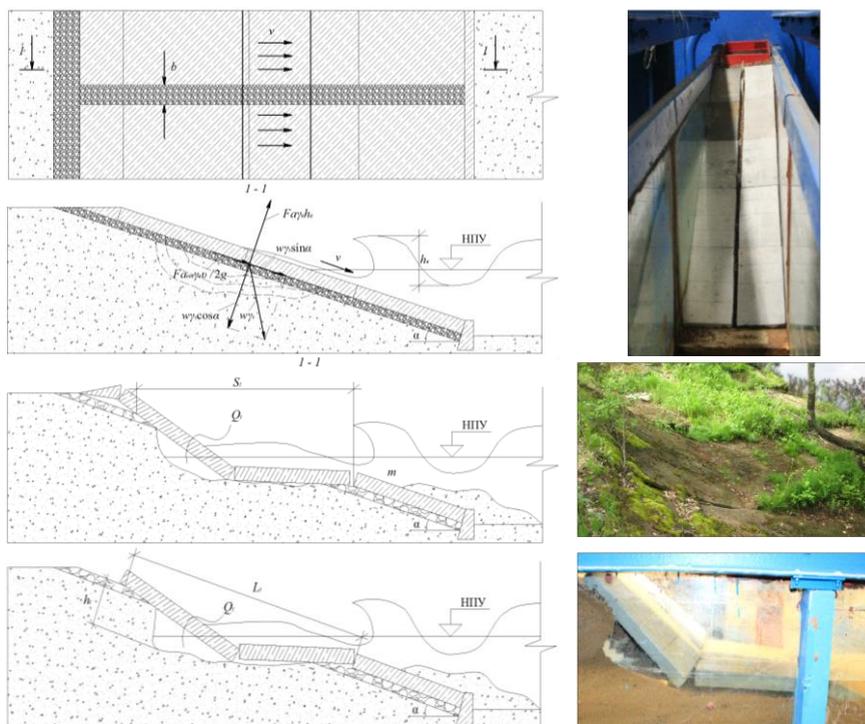
Отношение сдвигающих сил в правой части уравнения (4) к удерживающим силам в левой представляет собой критерий устойчивости откоса, закрепленного плитами  $\Pi_k$ , который при средних значениях коэффициентов  $a = 0,27(1 - n_s)$  и  $a_{от} = 0,02$  имеет такой вид:

$$\Pi_k = \frac{\rho'_s (mf - 1) d}{\left[ \frac{0,02v^2}{2g} + 0,27(1 - n_s) h_B f \right] \sqrt{1+m^2}} \quad (5)$$

Устойчивость откоса с креплением будет обеспечиваться при численных значениях критерия  $\Pi_k$ , равных  $\Pi_k \geq 1$ , при которых профиль откоса, покрытый плитами, с нарушенной структурой приобретает контур профиля динамического равновесия, принятого для расчетного типа грунта.

В результате лабораторных экспериментов установлено, что критерий устойчивости откоса, имеющего крепление железобетонными плитами  $\Pi_k$ , зависит от сквозности поверхности крепления откоса, а также гранулометрического состава и коэффициента неоднородности грунта –  $\eta$ , крупности частиц грунта, образующего тело подпорного сооружения, средний диаметр –  $d_{50}$ .

На рисунке 7 приведено соотношение результатов лабораторных, натуральных и теоретических исследований устойчивости напорного берегового откоса.



**Рисунок 7 – Результаты лабораторных, натуральных и теоретических исследований устойчивости плит крепления**

Источник – Разработка автора на основе собственных исследований.

По материалам лабораторных экспериментов получены распределения скоростей волнового потока по креплению откоса в различных точках разрушения волны, необходимые для оценки поперечной и продольной устойчиво-

сти плит крепления. На основе обобщения материалов натуральных и лабораторных исследований разработан критерий устойчивости, а также методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. По результатам анализа литературных данных установлено, что практически на всех водохранилищах Беларуси используются главным образом каменная наброска и железобетонные плиты креплений верховых откосов дамб и плотин, а также размываемых естественных берегов. Общая протяженность берегоукрепления, представленного креплениями из железобетонных и сборных железобетонных плит, составляет 250 км, из них около 55 % находится в неудовлетворительном состоянии. На данных берегоукрепительных сооружениях наблюдаются деформации в виде: разрушения швов, поверхности бетонного крепления, выноса грунта обратного фильтра, что ведет к разрушению креплений и откосов ГТС [1; 6; 8; 20; 22; 27].

2. На основании наблюдений и анализа литературных данных установлено, что одной из основных причин нарушения устойчивости берегоукрепления является совместное воздействие волновых давлений и, соответственно, скоростей волнового потока над и под поверхностью плит крепления при различных положениях уровня верхнего бьефа, которое до настоящего времени не учитывалось в проектных решениях при оценке устойчивости откосов [6; 9–11; 14; 23; 29; 32; 34].

3. По материалам натуральных обследований креплений откосов более чем на 105 водохранилищах страны автором дана количественная оценка деформаций креплений и условий нарушения устойчивости, а также установлено, что при колебании уровней от 0,5 до 6,0 метров более 50 % характерных типов деформаций нарушения устойчивости сооружений – это разрушение заполнения швов между плитами крепления, также систематизированы случаи и варианты потери устойчивости, разработана карта районирования территории Беларуси по фактическому состоянию берегозащитных сооружений, в том числе с бетонным и железобетонным креплением откосов. По результатам натуральных обследований разработана структура и форма базы данных по оценке состояния водохранилищ Беларуси, сооружений инженерной защиты и гидротехнических сооружений и произведено ее наполнение фактическим материалом по 105 искусственным водным объектам, что составляет 66 % от общего количества указанных объектов объемом от 1 млн. м<sup>3</sup> [2; 12; 14; 16–18; 35; 36; 39].

4. На основании данных, полученных по результатам натуральных обследований и с учетом факторов, влияющих на устойчивость плит креплений, проведена систематизация нагрузок и воздействий, что позволило предложить критерий устойчивости  $P_k$  откосов земляных плотин и берегов водохранилищ, в

том числе с берегозащитными сооружениями, учитывающий параметры ветрового волнения, колебания уровня верхнего бьефа, зависящие от назначения водоема и условий эксплуатации [2; 3–5; 14; 16; 18; 26; 38; 41].

5. По результатам лабораторных и натуральных исследований установлено, что в условиях русловых водохранилищ, имеющих вытянутую форму, большую проточность и водообмен, а также размещение на них ГЭС, внутриводоемные и вдольбереговые течения при совместном действии с ветровым волнением в прибрежной зоне могут ускорить процесс разрушения креплений откосов, а также способствуют выносу и транспортировке материала переработки из-под плит крепления с проявлением в этих местах деформаций откосов дамб, что отображается также в результате проведения численного эксперимента [2; 14; 15; 19; 24; 29; 34].

6. В результате лабораторных опытов установлено различие в распределении волновых нагрузок на поверхностях плит крепления, обращенных в сторону водохранилища и тела подпорного земляного сооружения, что позволило определить расчетные схемы устойчивости плит креплений откосов, учитывая их поперечную устойчивость при воздействии волнения, колебания уровней и фильтрационного давления [2; 6; 15; 19].

7. На основе обобщения материалов натуральных и лабораторных исследований разработаны методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси, использование которых позволит оперативно на стадии проектирования производить оценку принимаемых проектных решений по выбору варианта плит крепления в результате учета критерия  $L_k$  [3; 7; 35; 41].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная методика оценки продольной и поперечной устойчивости креплений откосов и берегов, методические рекомендации и база данных по оценке состояния водохранилищ Беларуси, сооружений инженерной защиты и гидротехнических сооружений могут быть использованы в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям при прогнозировании трансформации берегов откосов, дамб и плотин водохранилищ (с берегоукреплением и без него) с указанием возможных масштабов, а также при разработке мероприятий и оценке обстановки по ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера на данных водных объектах и прилегающей территории.

2. Результаты лабораторных исследований устойчивости откосов дамб и плотин с берегоукреплением для защиты от ветровых волн использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Производство расчетов по осадке торфяной залежи площадью около 140 га на объекте «Строительство жилой застройки с объектами инфраструктуры в районе аг. Ратомка Ждановичского сельсовета Минского района» (Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, 2021).

3. Методика оценки устойчивости креплений верховых откосов дамб и плотин и берегозащитных сооружений водохранилищ, результаты лабораторных и натурных исследований устойчивости берегозащиты, а также численное моделирование распределения внутриводоемных стоковых и вдольбереговых течений использованы при проектировании объекта № 121: «Строительство Витебской ГЭС на реке Западная Двина. Мероприятия по ложу водохранилища» (проекты РУП «Белгипроводхоз», Минск, 2015). По участку строящегося водохранилища проведен расчет незакрепленных береговых склонов, проектируемых защитных сооружений и выбран эффективный вариант берегозащиты на основе разработанного метода оценки устойчивости, что позволило получить для защищаемого участка берега протяженностью 1850 м экономический эффект в размере 594,14 млн руб. в ценах на ноябрь 2015 г.

4. Результаты диссертационной работы использованы в деятельности областных управлений МЧС Республики Беларусь – база данных по оценке состояния водохранилищ, сооружений инженерной защиты и гидротехнических сооружений, которая упрощает принятие управленческих решений по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end, centered on a light blue background.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь

1. Левкевич, В. Е. Причины нарушения устойчивости защитных сооружений на искусственных водных объектах / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук**, В. В. Кобяк // Мелиорация. – 2009. – № 1 (61). – С. 79–85.

2. Левкевич, В. Е. Исследование режима стоковых и вдольбереговых течений в русловых водохранилищах Беларуси для оценки их безопасной эксплуатации / В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк, **А. В. Бузук** // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 2 (92). – С. 115–118.

3. **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.

4. Левкевич, В. Е. Деформации креплений откосов подпорных сооружений на водоемах технологического назначения / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук** // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 5. – С. 62–72.

5. Левкевич, В. Е. Воздействие поверхностно-активных веществ на устойчивость откосов ограждающих дамб водоемов / В. Е. Левкевич, Д. С. Миканович, **А. В. Бузук** // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 2. – С. 64–71.

6. Deformations of upper soil slopes of retaining structures and shores with violated reinforced concrete fastening in riverbed reservoirs in Belarus : Limnological Review / V. Levkevich, **A. Buzuk**, I. Kirvel, S. Parfomuk. – London, 2021. – Vol. 21, № 1. – P. 29–41.

7. Levkevich, V. Stateczność górnych skarp i brzegów zbiorników z odkształconymi łącznikami żelbetowymi w warunkach rozwoju wód śródlądowych / V. Levkevich, **A. Buzuk**, D. Mikanovich // Słupsk. Słupskie prace geograficzne. – 2021. – № 18. – S. 55–74.

### Статьи в других изданиях

8. Оценка ущерба от абразионных риск-процессов на водных объектах Республики Беларусь / В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк, С. М. Пастухов, М. С. Кукшинов, **А. В. Бузук** // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – № 2 (8). – С. 69–73.

9. Левкевич, В. Е. Гидродинамическое воздействие на устойчивость берегоукрепительных сооружений Республики Беларусь / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук** // Вестн. Команд.-инженер. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 27–32.

10. Методика и результаты натурных обследований искусственных водных объектов Республики Беларусь, как источников чрезвычайных ситуаций природного характера / Г.И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук** // Труды БГТУ. – 2012. – № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – С. 236–238.

11. Моделирование режима стоковых течений водохранилищ на основе программных средств для оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук**, А. А. Новиков // Труды БГТУ. – 2012. – № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – С. 239–240.

12. **Бузук, А. В.** Результаты натурных обследований гидротехнических сооружений водохранилищ / **А. В. Бузук** // Вестн. Командн.-инженер. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 91–96.

13. Оценка ущербов от чрезвычайных ситуаций на водных объектах Республики Беларусь / Г. И. Касперова, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук** // Труды БГТУ. – 2014. – № 2 (166). Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – С. 143–145.

14. Учет технического состояния гидротехнических сооружений при предупреждении чрезвычайных ситуаций на водных объектах / Г. И. Касперова, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, В. А. Малашевич, **А. В. Бузук** // Труды БГТУ. – 2014. – № 2 (166). Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – С. 146–149.

15. **Бузук, А. В.** Результаты лабораторных исследований деформаций откосов с берегоукрепительными сооружениями водохранилищ и их влияние на безопасность объекта в чрезвычайных ситуациях / **А. В. Бузук** // Вестн. Командн.-инженер. ин-та. МЧС Респ. Беларусь. – 2015. – № 2 (22). – С. 79–86.

16. Левкевич, В. Е. Исследование устойчивости и эффективности работы берегозащитных сооружений водохранилищ Беларуси с использованием материалов натурных наблюдений, физического и математического моделирования / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук** // Актуальные вопросы экономики строительства и городского хозяйства. – 2015. – С. 112–126.

17. База данных гидротехнических сооружений шламохранилищ и прудов-накопителей мелиоративных и польдерных систем для предупреждения чрезвычайных ситуаций / Г. И. Касперов, **А. В. Бузук**, Д. С. Миканович, В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2016. – № 2 (40). – С. 48–59.

18. **Бузук, А. В.** Продольная устойчивость верховых откосов ограждающих дамб и береговых склонов в условиях развития внутриводоемных течений / **А. В. Бузук** // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 2 (44). – С. 51–58.

19. Пастухов, С. М. Лабораторные исследования уровня режима каскада гидроузлов Азербайджанской Республики / С. М. Пастухов, Х. С. Османов, **А. В. Бузук** // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 4. – С. 447–457.

### **Материалы и доклады конференций**

20. Левкевич, В. Е. Факторы, оказывающие воздействие на устойчивость берегозащитных сооружений / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук** // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития : материалы IV Междунар.

науч. конф., посвящ. 80-летию Нац. академии наук Беларуси, Брест, 10–12 сент. 2008 г. / Полес. аграр.-эколог. ун-т; редкол. : Н. В. Михальчук (отв. ред.), А. А. Волчек, Н. М. Шпендик. – Брест, 2008. – С. 254.

21. **Бузук, А. В.** Математическое и гидравлическое моделирование конвективной диффузии загрязнений в русловых водохранилищах / **А. В. Бузук**, В. Е. Левкевич, А. А. Новиков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы IX Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 20–24 ноября 2011 г. : в 3 т. / БНТУ; редкол. : И. И. Разин [и др.]. – Минск, 2011. – С. 319.

22. Левкевич, В. Е. Закономерности развития береговой зоны озер и водохранилищ озерного типа Беларуси / В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк, **А. В. Бузук** // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию геогр. фак. БГУ, Минск, 12–17 сент. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т, Белорус. геогр. о-во; редкол. : Т. М. Михеева [и др.]. – Минск, 2011. – С. 201.

23. **Бузук, А. В.** Моделирование стоковых течений для оценки устойчивости незащищенных береговых склонов водохранилищ Беларуси / **А. В. Бузук**, С. М. Пастухов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : материалы Междунар. науч. конф. : в 2 ч. – Минск, 4–5 апр. 2013 г. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь ; орг. ком. : И. И. Полевода [и др.]. – Минск, 2013. – Ч. 1. – С. 21–22.

24. Методика лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов / **А. В. Бузук**, Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, Д. С. Миканович, С. М. Пастухов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 2–3 апр. 2015 г. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь; орг. ком. : И. И. Полевода [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 1. – С. 85–86.

25. Результаты определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов / **А. В. Бузук**, Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, Д. С. Миканович, С. М. Пастухов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 2–3 апр. 2015 г. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь; орг. ком. : И. И. Полевода [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 1. – С. 86–87.

26. Левкевич, В. Е. Критерии устойчивости берегов водохранилищ и верховых откосов дамб и плотин / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук** // Материалы V Всерос. науч. конф. с междунар. участием, объединенной с XXXIV Пленарным совещанием Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозийных, русловых и устьевых процессов. – М., 2019. – С. 280–282.

27. **Бузук, А. В.** Анализ причин и последствий гидродинамических аварий на водных объектах, связанных с разрушением береговых склонов / **А. В. Бузук**, В. В. Кобяк, Д. С. Миканович // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Белорус. нац. техн. ун-та. – Минск, 2020. – С. 314–319.

28. Оценка состояния поверхностных водозаборов и очистных сооружений с использованием беспилотных летательных аппаратов и средств дистанцион-

ной диагностики / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук**, В. А. Лосицкий, Ф. Н. Саидов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Белорус. нац. техн. ун-та. – Минск, 2020. – С. 119–123.

29. Натурные исследования устойчивости участков берегов и русел судоходных рек и каналов Беларуси / **А. В. Бузук**, В. Е. Левкевич, Г. И. Касперов, Д. С. Миканович // Сб. науч. трудов Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2021. – С. 179–192.

### **Тезисы докладов**

30. Левкевич, В. Е. Моделирование чрезвычайных ситуаций, вызванных загрязнением водных объектов химическими опасными веществами на основе программных средств / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук**, А. А. Новиков // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2011 г. : в 2 т. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь, редкол. : А. Ю. Лупей [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 405–408.

31. Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера / **А. В. Бузук**, Г. И. Касперов, В. В. Кобяк, В. Е. Левкевич, А. А. Новиков, С. М. Пастухов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2011 г.: в 2 т. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь, редкол. : А. Ю. Лупей [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 415–417.

32. Моделирование режима стоковых течений водохранилищ на основе программных средств для оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук**, А. А. Новиков // Тез. 76-й науч.-технич. конф. профес.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов, Минск, 04–09 фев. 2012 г. / отв. за изд. И. М. Жарский. – Минск, 2012. – С. 123–124.

33. Пастухов, С. М. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на гидроузлах Беларуси с учетом их технического состояния / С. М. Пастухов, **А. В. Бузук**, Г. И. Касперов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 мая 2012 г. / Гомел. инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь; редкол. : И. И. Суторьма [и др.]. – Ч. 1. – Гомель, 2012. – С. 100.

34. **Бузук, А. В.** Результаты обследований гидротехнических сооружений водохранилищ Республики Беларусь / **А. В. Бузук**, С. М. Пастухов // Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций : сб. тез. докл. Междунар. науч. конф., – Минск, 26–27 сент. 2013 г. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь ; орг. ком. И. И. Полевоеда [и др.]. – Минск, 2013. – С. 217.

35. Методика оценки технического состояния сооружений напорного фронта по результатам натурных обследований водных объектов Республики Беларусь / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук** // Тези-

сы 77-й Науч.-технич. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов, Минск, 04–09 фев. 2013 г. / отв. за изд. И. М. Жарский. – Минск, 2013. – С. 128–129.

36. Состав и структура электронной базы гидротехнических сооружений на водохранилищах Республики Беларусь / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук** // Тезисы 77-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов, Минск, 04–09 фев. 2013 г. / отв. за изд. И. М. Жарский. – Минск, 2013. – С. 126–127.

37. Результаты определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов / В. Е. Левкевич, Д. С. Миканович, Г. И. Касперов, С. М. Пастухов, **А. В. Бузук** // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 2–3 апр. 2015 г. : в 2 ч. / Командно-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь; редкол. : И. И. Полевада [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 1. – С. 86–87.

38. **Бузук, А. В.** Развитие современных геодинамических процессов на берегах водохранилищ ГЭС «каньонного» типа, расположенных на северо-западе Республики Беларусь / **А. В. Бузук**, В. Е. Левкевич // Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии: сб. докладов Междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию Ташкенской геофизической обсерватории. – Ташкент, 2018. – С. 363–367.

39. Левкевич, В.Е. Инженерно-геологическое районирование территории Беларуси по развитию переработки берегов и откосов дамб и плотин на водохранилищах / В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк, **А. В. Бузук** // Материалы междунар. науч.-практ. конф., по проблемам снижения природных опасностей и рисков «ГЕОРИСК-2018». – М., 2018. – С. 204–209.

40. **Бузук, А. В.** Определение основных подходов по оценке условий возникновения чрезвычайных ситуаций на судоходных реках и каналах / **А. В. Бузук**, Д. М. Миканович, С. М. Пастухов // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей). – Минск, 2020. – С. 28–30.

41. Левкевич, В. Е. Геоэкологическое обоснование расположения водохранилищных поверхностных водозаборов с учетом развития современных экзогенных береговых процессов / В. Е. Левкевич, **А. В. Бузук**, Ф. Н. Саидов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию акад. АН РУз Г. А. Мавлянова. – Ташкент, 2020. – С. 241–244.

### **Учебно-методические материалы**

42. Бузук, А. В. Методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси / авт.-сост. : В. Е. Левкевич, А. А. Новиков, **А. В. Бузук**. – 2-е изд. перераб. и доп. – Минск : Право и экономика, 2023. – 46 с.

**РЭЗІЮМЭ**  
**Бузук Аляксандр Вячаслававіч**

**УСТОЙЛІВАСЦЬ МАЦАВАННЯЎ АДХОНАЎ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛАЦІН  
І БЕРАГОЎ ВАДАСХОВІШЧАЎ ПРЫ ТРАНСФАРМАЦЫІ  
ГІДРАЛАГІЧНАГА РЭЖЫМУ**

**Ключавыя словы:** берагаахова, вадасховішча, гідрадынамічная аварыя, гідратэхнічныя збудаванні, гідравузел, узровеньны рэжым, ўстойлівасць.

**Мэта** – распрацаваць крытэрыі і мадэлі страты ўстойлівасці мацаванняў адхонаў дамбаў і плацін, а таксама берагоў вадасховішчаў і прапановы па павышэнню эфектыўнасці берагаўмацавання.

**Метады даследавання і апаратура.** Метадалогія працы спалучае разлік параметраў падоўжнай і папярочнай хуткасцяў патоку, ціску на паверхні пліт мацавання адхону і ў падплітным прасторы, натурныя абследаванні збудаванняў напорнага фронту і берагоў вадасховішчаў і лабараторныя вымярэння ўстойлівасці адхонаў дамбаў і плацін вадасховішчаў. Для рэгістрацыі параметраў пры правядзенні натуральных і лабараторных даследаванняў выкарыстоўваліся: хвалямерная рэйка; вымяральнік хуткасці ГР-42; мікракамп’ютэрны расхадамер-хуткасцямер; нівелір; анемометр чашачны; пьезометры; камплект фізічных, гідралагічных і батыметрычных карт; мерныя іголки; фота- і відэакамера.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Сістэматызаваны схемы разбурэння і распрацаваны тры магчымыя варыянты парушэння ўстойлівасці пліт мацавання і страты ўстойлівасці адхонаў. Атрыманы вынікі, якія паказалі адрозненне ў размеркаванні хвалевых нагрузак на паверхнях пліт мацавання, звернутых у бок вадасховішча, цела дамбы або плаціны. Распрацавана схема сіл, якія дзейнічаюць на элемент грунту на адхоне, з жалезабетонным пакрыццём з парушанай структурай, што дазволіла ўвесці аўтару для ацэнкі агульнай ўстойлівасці пліт мацаванняў крытэрыі ўстойлівасці  $P_n$ , які залежыць ад іх суадносін. Распрацаваны метадычныя рэкамендацыі па разліку ўстойлівасці мацаванняў верхавых адхонаў дамбаў, плацін і берагоў вадасховішчаў Беларусі.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Вынікі дысертацыйнага даследавання могуць быць выкарыстаны праектнымі арганізацыямі пры распрацоўцы архітэктурных і будаўнічых праектаў, а таксама органамі і падраздзяленнямі МНС пры прагназаванні трансфармацыі берагоў адхонаў, дамбаў і плацін вадасховішчаў.

**Галіна выкарыстання.** Праектна-канструктарскія арганізацыі, органы і падраздзяленні па надзвычайных сітуацыях, вышэйшыя навучальныя ўстановы.

## РЕЗЮМЕ

Бузук Александр Вячеславович

### УСТОЙЧИВОСТЬ КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

**Ключевые слова:** берегозащита, водохранилище, гидродинамическая авария, гидротехнические сооружения, гидроузел, уровенный режим, устойчивость.

**Цель работы** – разработать критерии и модель потери устойчивости берегозащитных сооружений откосов дамб и плотин, а также берегов водохранилищ и предложения по повышению эффективности берегоукрепления.

**Методы исследования и аппаратура.** Методология работы сочетает расчет параметров продольной и поперечной скоростей потока, давления на поверхности плит крепления откоса и в подплитном пространстве, натурные обследования сооружений напорного фронта и берегов водохранилищ и лабораторные измерения устойчивости откосов дамб и плотин водохранилищ. Для регистрации параметров при проведении натуральных и лабораторных исследований использовались: волномерная рейка; измеритель скорости ГР-42; микрокомпьютерный расходомер-скоростемер; нивелир; анемометр чашечный; пьезометры; комплект физических, гидрологических и батиметрических карт; мерные иглы; фото- и видеокамера.

**Полученные результаты и их новизна.** Систематизированы схемы разрушения и разработаны три возможных варианта нарушения устойчивости плит крепления и потери устойчивости откосов. Получены результаты, которые показали различие в распределении волновых нагрузок на поверхностях плит крепления, обращенных в сторону водохранилища, тела дамбы или плотины. Разработана схема сил, действующих на элемент грунта на откосе, покрытого железобетонным покрытием с нарушенной структурой, что позволило ввести автору для оценки общей устойчивости плит креплений критерий устойчивости  $P_k$ , зависящий от их соотношения. Разработаны методические рекомендации по расчету устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси.

**Рекомендации по использованию.** Результаты диссертационного исследования могут быть использованы проектными организациями при разработке архитектурных и строительных проектов, а также органами и подразделениями МЧС при прогнозировании трансформаций берегов откосов, дамб и плотин водохранилищ.

**Область применения.** Проектно-конструкторские организации, органы и подразделения по чрезвычайным ситуациям, высшие учебные заведения.

**SUMMARY**  
**Buzuk Aliaksandr**

**STABILITY OF FASTENINGS OF SLOPES OF EARTHEN DAMS AND  
BANKS OF RESERVOIRS DURING TRANSFORMATION OF THE  
HYDROLOGICAL REGIME**

**Key words:** bank protection, reservoir, hydrodynamic accident, waterworks, hydrodynamic structures, level regime, stability.

**The aim of the research:** to develop the criteria and model of stability loss of embankments and dikes slopes, reservoir banks, as well as make proposals to increase the efficiency of bank stabilization.

**The methods of analysis and equipment.** The methodology of the work combines the calculation of parameters of longitudinal and transverse flow rates, calculation of pressure on the surface of slope fixing plates and under plate space, field surveys of waterfront structures and banks of reservoirs, and laboratory measurements of stability embankments' slopes and dike at reservoirs. To register the parameters while carrying out field and laboratory studies were used: wave staff; speedometer *GR-42*; microcomputer-races-flow meter-speedometers; level; cup anemometer; piezometer; set of physical, hydrological and bathymetric charts; measuring needle; photo and video camera.

**Obtained results and their novelty.** The schemes of destruction are systematized; three possible variants of violation of fixing plates and loss of slopes stability have been developed. The results, which showed the difference in the distribution of wave loads on the surfaces of fixing plates facing towards the reservoir, dike or embankment, have been obtained. A diagram of the forces acting on the soil element on the slope, covered with a reinforced concrete coating with a broken structure, was developed, which allowed the author to introduce the stability criterion  $\Pi_k$  depending on their ratio. The recommendations for the calculation of stability of fastenings of upper dikes' slopes, embankments and banks of water reservoirs of Belarus are developed.

**Guidance for use.** The results of the research can be used by design organizations in the development of architectural and construction projects, as well as by bodies and units of the Ministry of emergency situations in predicting transformations of slopes of banks, embankments and dikes of water reservoirs.

**The field of application.** Design organizations, bodies and units for emergency situations, higher education institutions.

Научное издание

**БУЗУК**  
**Александр Вячеславович**

**УСТОЙЧИВОСТЬ КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН  
И БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.07 – гидротехническое и мелиоративное строительство

Подписано в печать 18.05.2024. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,57. Тираж 70. Заказ 344.

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.