

Левкевич В.Е.

Белорусский национальный технический университет, Минск
Беларусь
eco2014@tut.by
ORCID: 0000-0002-1833-1495

Бузук А.В.

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Минск
Беларусь
uk007@rambler.ru
ORCID: 0000-0002-8356-9977

Миканович Д.С.

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Минск
Беларусь
dmikanovich@list.ru
ORCID: 0000-0002-3560-1741

УСТОЙЧИВОСТЬ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ И БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ С ДЕФОРМИРОВАННЫМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КРЕПЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ВНУТРИВОДОЕМНЫХ ТЕЧЕНИЙ

STEADINESS OF UPPER SLOPES OF PROTECTING DAMS AND COASTAL SLOPES WITH DEFORMED REINFORCED CONCRETE ANCHORS UNDER CONDITIONS DEVELOPMENT OF INTRA-AQUATIC CURRENTS

Резюме: Рассмотрены условия воздействия ветрового волнения на грунтовые верховые откосы подпорных сооружений и естественные берега, имеющие крепление в виде железобетонных плит покрытия с деформациями. Показаны результаты моделирования режима внутриводоемных течений и натурных обследований искусственных водных объектов. Предложен критерий для оценки устойчивости грунтовых откосов и береговых склонов, имеющих железобетонное крепление с нарушенной структурой и определены условия его применимости. Предложены мероприятия по инженерной защите берегов водохранилища.

The conditions of the impact of wind waves on the ground uphill slopes of the retaining structures and natural shores, having fastening in the form of reinforced concrete slabs with deformation, are considered. The results of the analysis of field surveys inland currents and field surveys of artificial water bodies. A criterion for assessing the stability of ground slopes and coastal slopes with reinforced concrete fastening with a broken structure is proposed, and the conditions for its applicability are determined. Measures for engineering protection of the reservoir banks is proposed.

Ключевые слова: водохранилище; берегоукрепительное сооружение; моделирование; устойчивость, критерий устойчивости

Key words: reservoir; coast protection structure; modeling; steadiness; steadiness criterion

Введение

Общая длина берегоукрепительных сооружений и закрепленных откосов дамб и плотин различными видами креплений на водохранилищах Республики Беларусь составляет около 250 км. Длина поврежденных и разрушенных берегоукрепительных сооружений по данным натурных обследований, проведенных с 2007 по 2017 годы – оценена в пределах 44% или 110 км [Kalinin].

Значительные сроки эксплуатации водохранилищ способствуют износу основных фондов, поэтому состояние берегоукрепительных сооружений, обеспечивающих устойчивость и «консервацию» первоначального состояния берегового склона, дамбы или плотины, крайне важно для нормального функционирования объекта и снижения риска возникновения и развития аварий.

Основная часть. Исследование устойчивости берегоукрепительных сооружений.

Одной из причин возникновения чрезвычайных ситуаций на водоемах является нарушение местной устойчивости напорного фронта в результате чего происходит повреждение швов, механическое разрушение поверхности плит крепления берегоукрепительных сооружений и т. д., что в свою очередь приводит к аварии. Ниже на рисунке 1 приведены характерные повреждения берегоукрепительных сооружений, зарегистрированные на водохранилищах Беларуси.



Водохранилище «Лепельское»



Водохранилище «Волпа»



Водохранилище «Острошицкий Городок»



Водохранилище «Чигиринское»

Рис. 1. Типичные повреждения креплений откосов и берегов

Fig. 1. Typical damage to slope and bank fastenings

Источник: [Kalinin].

Source: [Kalinin].

Автором в результате многочисленных лабораторных экспериментов, а также длительных многолетних натурных исследований было установлено, что нарушение целостности и дальнейшее разрушение крепления откосов и береговых склонов водохранилищ, выполненное из сборных железобетонных плит может происходить по трем расчетным схемам (рисунок 2) [Buzuk 2015].

Полученные в лабораторных условиях расчетные схемы разрушения берегоукрепительных сооружений характеризуются следующими показателями:

1-я схема – НПУ находится ниже разрушенного заполнения межплиточных швов;

2-я схема – НПУ находится в нижней части плит с разрушенными заполнения межплиточных швов;

3-я схема – НПУ находится в верхней части плит с разрушенными заполнения межплиточных швов.

Системный анализ причин, влияющих на состояние берегоукреплений показал, что к основным причинам, вызывающим их разрушение относятся:

- недостаточно полный учет условий эксплуатации водохранилищ Беларуси, связанный с изменениями характера регулирования, что влияет на уровеньный режим водного объекта и режим волнения [Buzuk 2015; Levkevich V.E. 2015];
- инженерные расчеты, использующие укрупненные расчетные схемы и зависимости, разработанные для морских условий и условий крупных водохранилищ;
- неточности изысканий в сочетании с невысоким качеством строительно-монтажных работ;
- отсутствие должного технического надзора за качеством строительства;
- низкий уровень эксплуатации и ремонта сооружений (заделки швов, подсыпки размывов и т.д.);
- отсутствие отдельной эксплуатационной службы и системы мониторинга состояния сооружений гидроузла.

Устойчивость берегоукрепительных сооружений водохранилищ определяют: гидродинамические, гидрогеологические, климатические, гидрометеорологические, геоморфологические, биологические и другие факторы и условия [Buzuk; Levkevich V.E. 2015; Zolotarev; Mikhnevich; Levkevich E.M. 1977].

К основным факторам, вызывающим деформации креплений откосов дамб и плотин, а также естественных берегов водных объектов относятся уровеньный, ветро-волновой и ледовый режимы, а также режим течений и вдольбереговое движение наносов.

В процессе натурного обследования водохранилищ с берегоукрепительными сооружениями, а всего было обследовано более 100 водохранилищ страны, – были также выделены условия, влияющие на масштаб и интенсивность деформации откосов: форма и угол заложения подводной и надводной частей откоса и берегового склона; превышение откоса и высота берега над НПУ водохранилища; форма береговой линии в плане; состав, структура, физико-механические свойства грунтов; избыточное увлажнение и суффозионные процессы, а также сама конструкция берегоукрепительных сооружений [Levkevich V.E. 2015; Zolotarev, Mikhnevich, Levkevich E.M. 1977].

Для защиты берегов в Беларуси в зависимости от характера грунтов, слагающих откос, и морфометрических характеристик водоема используют следующие береговые одежды: волноломы, прерывистое крепление, комбинированная защита. Береговые волноломы – сооружения трапециевидного поперечного сечения, предназначенные для защиты от размывающего действия волн береговой линии на небольшом расстоянии от уреза воды. Данный тип берегоукрепительного сооружения применяется на Заславском водохранилище. Кроме береговых волноломов на водохранилище Погост для защиты берега от размыва применяется берегоукрепительное сооружение в виде выдающейся

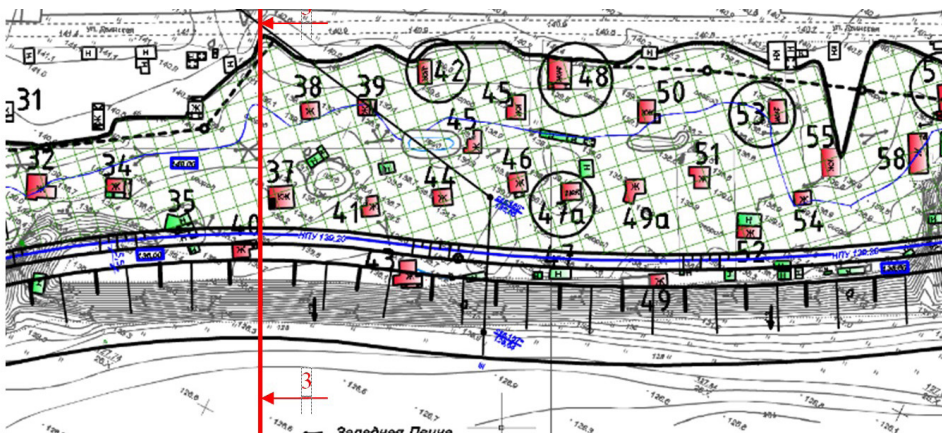
вглубь водоема поперечной дамбы с бунами, прерывающими вдольбереговое перемещение наносов [Shaytan; Pyshkin].

Прерывистое крепление берега разработано Ю.Н. Сокольниковым и представляет собой искусственный аналог бухтового берега: с небольшими глубинами у защищенных участков (мысов) и отмелями в бухтах [Shaytan, Pyshkin, Levkevich E.M. 1979; Levkevich V.E. 1984].

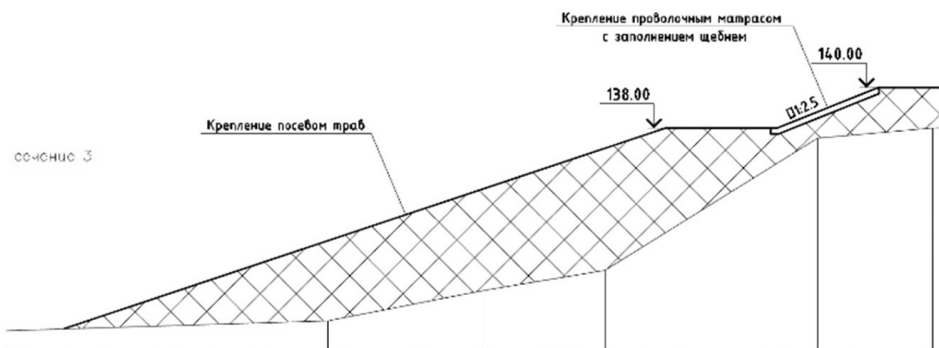
В Беларуси широко применяется комбинированная защита берегов водохранилищ. Выбор данного типа крепления обусловлен местными условиями: составом грунтов, слагающих берег; морфометрическими показателями водоема; уровнем грунтовых вод [Levkevich V.E. 2018; Buzuk 2011]. Примером использования комбинированной защиты берегов является Лепельское водохранилище.

Учитывая назначение волноломов и прерывистого крепления берега, их применение на водохранилищах Беларуси в большинстве случаев нецелесообразно ввиду малых размеров самих водоемов, а вместе с этим и незначительных параметров волнения и объема переносимых наносов относительно крупных водохранилищ и побережий морей и океанов.

На введенных в строй в 2017 году водохранилище Витебская ГЭС и в 2018 году Полоцкой ГЭС активно применяется комбинированная защита в виде: каменной наброски совместно с сетчатыми матами из рваного камня, железобетонных плит покрытия совместно с волноотбойной стеной, каменной наброски совместно с уположенным откосом, биологического крепления совместно с сетчатыми матами из рваного камня. В качестве объекта исследования был выбран участок водохранилища Витебской ГЭС у садового товарищества «Судостроитель». На рисунке 3 приведен вид запроектированного берегоукрепительного сооружения на этом участке.



а) участок берега с комбинированной защитой



б) разрез по 3-му сечению берега на исследуемом участке берега

Рис. 3. Берегоукрепительные сооружения Витебской ГЭС

Fig. 3. Bank protection structures of the Vitebsk hydroelectric power station

Источник: [Levkevich V.E. 2018; Buzuk 2011].

Source: [Levkevich V.E. 2018; Buzuk 2011].

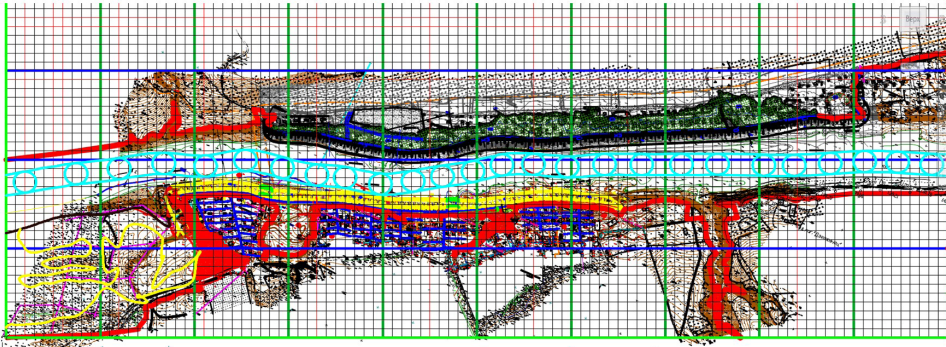
Устройство данного берегоукрепительного сооружения предполагало большой объем земляных работ и снос зданий у границы нормального подпорного уровня водохранилища, что привело бы к увеличению времени на его возведение и удорожанию проекта в целом. Поэтому, для уменьшения затрат при возведении объекта, было проведено моделирование режима стоковых течений для оценки устойчивости откосов берегов.

Моделирование режима стоковых течений участка на водохранилище Витебская ГЭС у садового товарищества «Судоостроитель» для оценки устойчивости берегов

При решении задач моделирования скоростной структуры внутриводоемных течений в водных объектах, к которым относятся водохранилища, важную роль играет определение соответствующих расчетных схем (алгоритмов), по которым в последующем будет выполняться расчет распределения поля скоростей по акватории водоема с оценкой устойчивости береговых склонов и откосов берегоукрепительных сооружений [Buzuk A.V., Levkevich V.E.].

Опираясь на данные, полученные в результате проведенных ранее натурных и лабораторных исследований, моделирование продольных скоростей проводилось на основе разработанного к.т.н. А.А. Новиковым кода в интегрированной среде разработки программного обеспечения, реализованного на языке TurboPascal, которое позволило произвести расчеты значения скоростей и напоров потока жидкости.

На рисунке 4 приведены данные для расчета скоростей и напоров по защищаемому участку водохранилища, полученные совместно с д.т.н. В.Е. Левкевичем [Levkevich V.E. 2018].



красные линии – зона водоотведения, желтая линия – берегоукрепление у д. Барвин.

Рис. 4. Исходные данные для расчета скоростей и напоров по участку водохранилища Витебская ГЭС у садового товарищества «Судостроитель»

Fig. 4. Initial data for calculating the velocities and pressures for the section of the Vitebsk HPP reservoir at the garden partnership «Sudostroitel»

Источник: [Levkevich V.E. 2018].

Source: [Levkevich V.E. 2018].

Представленные результаты моделирования получены на основе разработанной имитационной модели, использующей закономерности процесса конвективной диффузии. В основу моделирования режима внутриводоемных течений были положены законы движения воды и примесей в водоемах, с учетом возможного сопротивления. В используемом программном коде движение воды приближено к реальным условиям в том числе и за счет изменения шероховатости по глубине потока.

Для описания скоростной структуры жидкости в русловом водохранилище используется плановая (двухмерная) математическая модель, которая получается из уравнения Навье-Стокса путем интегрирования трехмерной задачи по z-вертикальной координате, т.е. по глубине водоема [Buzuk, Levkevich V.E., Novikov].

Одним из допущений при моделировании явилось игнорирование так называемой роторной составляющей скоростного потока, которая важна только при оценке процесса конвективной диффузии различных примесей, что позволило свести решение поставленной задачи к уравнению типа Лапласа:

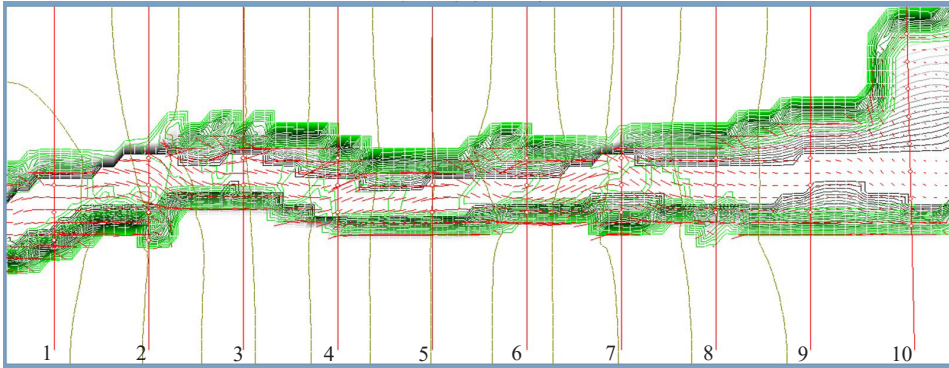
$$\Delta(F(x, y))\Delta=0 \quad (6)$$

Граничными условиями для уравнения (1) являются: неизменность уреза воды; отсутствие фильтрации при заданном перепаде отметок уровня на входном и выходном расчетных створах по моделируемому участку водохранилища.

Численное решение задач на базе уравнения (1) эффективно реализуется расщеплением по пространственным факторам, то есть путем сведения к малокритичному решению взаимозависимых одномерных задач.

В качестве исходной информации на координатной сетке задавались координаты контура береговой линии, глубины водоема и расчетные створы.

Результаты расчета распределения скоростных напоров в контрольных створах участка водохранилища Витебская ГЭС у садового товарищества «Судостроитель» приведены на рисунке 5.



серые линии – рельеф дна; зеленые линии – скоростной напор; бирюзовые линии – места максимальных скоростей; красные линии – расчетные створы

Рис. 5. Распределение скоростных напоров по участку водохранилища Витебская ГЭС у садового товарищества «Судостроитель»

Fig. 5. Distribution of velocity pressures in the section of the reservoir Vitebsk HPP near the garden partnership „Sudostroitel”

Источник: [Buzuk, Levkevich V.E., Novikov].

Source: [Buzuk, Levkevich V.E., Novikov].

На участках примыкания к урезу воды линий наибольшей насыщенности (максимальных скоростных напоров на рисунке 5) может наблюдаться разрушение верхних откосов ограждающей дамбы и берегов. Расчет скоростных напоров проводился при предусмотренной проектом постоянной отметке уровня верхнего бьефа водохранилища.

Результаты моделирования течений с учетом распределения по координатам расчетной сетки приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты распределения расчетных скоростей по координатам расчетной сетки на участке водохранилища

Tabela 1.

The results of the distribution of calculated velocities according to the coordinates of the computational grid in the reservoir section

Номер створа	Скорость v , м/с	Координата в узле сетки в расчетном створе
1	0,73	7,6
2	0,57; 0,42; 0,54; 1,66	12,0; 12,0; 7,6; 0,0

Номер створа	Скорость v , м/с	Координата в узле сетки в расчетном створе
3	0,49; 0,38	12,0; 12,0
4	0,5; 0,4	12,0; 12,0
5	3,1	4,3
6	2,6; 1,5	4,3; 6,0
7	0,51; 0,63	12,0; 5,8
8	0,6; 1,48	8,1; 6,3
9	0,61	5,8
10	2,8; 1,34	0,8; 3,7

Источник: [Buzuk, Levkevich V.E., Novikov].

Source: [Buzuk, Levkevich V.E., Novikov].

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что расчетные скорости стокового течения для незакрепленных участков береговых склонов превышают предельно допустимые значения. Эти участки будут подвержены деформации, что может привести к отступлению от запроектированных параметров береговой линии. Кроме того, определенные в результате расчета значения скоростей потока в совокупности с донными скоростями в границах старого русла реки Западная Двина, могут привести к деформациям запроектированного и строящегося берегоукрепления при несоблюдении требований технических нормативных правовых актов, регламентирующих их возведение.

При проектировании берегоукрепительных сооружений водохранилища «Витебская ГЭС» авторами учитывалось удобство его получения, монтажа и последующей эксплуатации, а также экономическая составляющая. Были предложены комплексные мероприятия по защите берега, включающие совместное использование: каменной наброски и сетчатых матов из рваного камня, каменной наброски и уположенного откоса (рисунок 6). Далее проводилась прогнозная оценка масштабов возможной переработки склонов после проведения берегоукрепительных мероприятий. В рамках «Технических предложений», разработанных совместно с д.т.н. В.Е. Левкевичем, были:

- выполнены прогнозные расчеты переработки береговой линии;
- проведены расчеты деформаций отсыпанных и спланированных откосов от совместного воздействия ветрового волнения, колебания уровней в верхнем бьефе, внутриводоемных и вдольбереговых течений и фильтрационных потоков;
- подготовлены предложения по изменению конструкции крепления откосов.

В результате анализа данных численного моделирования внутриводоемных течений установлено, что деформации могут подвергаться участки береговой линии, представленные ограждающими берегоукрепительными дамбами

и естественными берегами в зонах наибольшего воздействия и контакта скоростного потока.



Водохранилище «Витебская ГЭС»
защищаемый участок начало



Водохранилище «Витебская ГЭС»
защищаемый участок средняя часть



Водохранилище «Витебская ГЭС»
защищаемый участок нижняя часть



Водохранилище «Витебская ГЭС»
защищаемый участок нижняя часть

Рис. 6. Берегоукрепительные сооружения водохранилища «Витебская ГЭС» (комбинированная защита)

Fig. Bank protection structures of the reservoir «Vitebsk HPP» (combined protection)

Источник: [Chebotarev, Levkevich E.M. 1971; Maksimchuk].

Source: [Chebotarev, Levkevich E.M. 1971; Maksimchuk].

В соответствии с [Chebotarev, Levkevich E.M. 1971; Maksimchuk] под устойчивостью понимается способность конструкции или сооружения сохранять свои функции, защитные и несущие способности под действием внешних факторов. Факторы, выраженные в виде нагрузок и воздействий, приводящих к переработке береговой линии и деформации креплений сооружений, а также их распределение и сочетание, следует учитывать для оценки устойчивости креплений откосов и берегоукрепительных сооружений.

В условиях водохранилищ Беларуси, имеющих ограниченные линейные размеры, сила фильтрационного давления, оказывающая на плиты крепления и поверхность откоса взвешивающий эффект за счет значительного градиента

фильтрационного давления, может проявляться исключительно лишь в условиях естественных берегов при разгрузке фронта фильтрации на откос, что вызывает развитие суффозионных процессов. При инфильтрации фильтрационного потока из водохранилища в береговой склон – происходит эффект «прижимания» плиты к поверхности откоса [Levkevich E.M. 1971].

Схема воздействия и распределения волнового давления по откосу с покрытием из железобетонных плит приведена на рисунке 7. Наибольшие нагрузки возникают на откосе в точке 2, соответствующей зоне опрокидывания волны. Характер распределения скоростей в волновом потоке при разрушении на откосе отображен в виде эпюры распределения скоростей (рисунок 8).

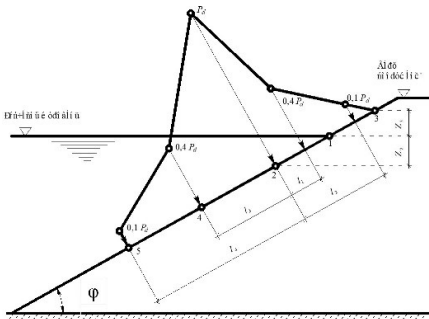
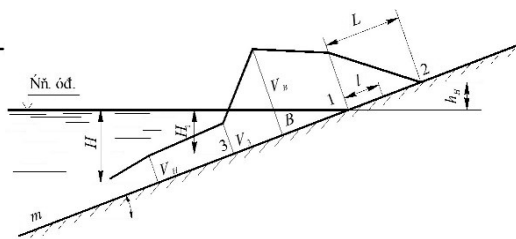


Рис. 7. Эпюра максимального волнового давления на откос, укрепленный плитами
Fig. 7. Diagram of maximum wave pressure on a slope reinforced with slabs
Источник: [Maksimchuk].
Source: [Maksimchuk].



Рису. 8. Распределение скоростей волнового потока по откосу
Fig. 8. Distribution of wave flow velocities along the slope
Источник: [Maksimchuk].
Source: [Maksimchuk].

В зоне разрушения и опрокидывания волны величины размывающих скоростей для грунтов подготовки и тела сооружения выше допустимых на размыв (рисунки 9, 10), что в случае наличия открытых швов вызывает вынос грунта из подплоточного пространства, расположенного на отметках близких к НПУ.

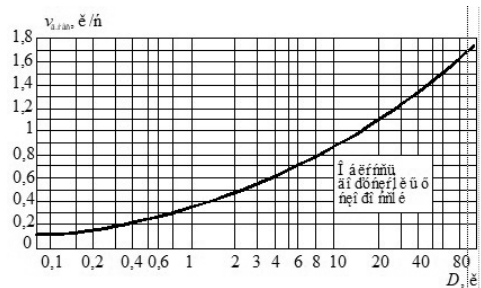
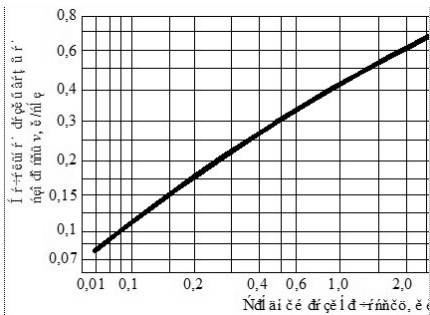


Рис. 9. График начальной размывающей волновой скорости для несвязного грунта

Fig. 9. Graph of the initial scouring wave velocity for non-cohesive soil
 Источник: [Mikhnevich; Maksimchuk; Buzuk 2018].
 Source: [Mikhnevich; Maksimchuk; Buzuk 2018].

Рис. 10. График допустимых значений размывающих донных скоростей

Fig. 10. Graph of permissible values of non-erosive bottom velocities
 Источник: [Mikhnevich; Maksimchuk; Buzuk 2018].
 Source: [Mikhnevich; Maksimchuk; Buzuk 2018].

Наблюдаемые межплиточные деформации по натурным данным составляют от 3–5 до 10–30 см при высоте возможных ветровых волн в условиях Беларуси до 1,2 м [Levkevich V.E. 2015; Zolotarev]. При протекающей гидродинамической чрезвычайной ситуации расчетная скорость волнового потока в точках 1, 2 и 3 (рисунок 8) на размыв для грунта наиболее эффективно будет определяться по [Shaytan]:

$$v_1 = \frac{10k_{ш}\sqrt{g}}{2\pi + m} \sqrt[6]{h^2\lambda} \quad (1)$$

$$v_1 = v_1 \left(1 - \frac{l}{h_n \sqrt{1 + m^2}} \right) \quad (2)$$

$$h_n = \frac{2k_{ш}}{m} h^3 \sqrt{\frac{\lambda}{h}} \quad (3)$$

$$v_3 = \frac{n\pi h}{\sqrt{\frac{\pi\lambda}{g}} sh \frac{4\pi H_1}{\lambda}} \quad (4)$$

$$H_1 = \frac{1,22}{m^{0,8}} \sqrt{h\lambda} \quad (5)$$

где: $k_{ш}$ – коэффициент шероховатости, равный для бетонных плит 0,9; g – сила ускорения свободного падения, м/с²; h_n – высота наката волны, м; m – коэффициент заложения откоса; h – высота расчетной 1% волны; λ – длина волны, м.

Устойчивость откоса в условиях волнового воздействия при откате волны

Известно, что пока профиль, подверженный деформациям не достиг динамически устойчивой формы, по его поверхности происходит перемещение материала переработки в виде наносов, как вдоль, так и поперек уреза воды. Также

известно, что устойчивость частиц грунта, образующего подводную часть профиля берега (откоса), формируется под действием гидродинамических нагрузок, вызванных ветровым волнением, прямыми и обратными течениями волнового потока [Pyshkin, Levkevich E.M. 1979; Levkevich V.E. 1984; Levkevich V.E. 2018].

Основной причиной разрушения откосов, находящихся в зоне действия волнового потока, является возникновение волнового гидродинамического давления и взвешивающего давления грунтового потока в подстилающем слое. Учет соотношения сил, действующих на элемент грунта, дает возможность решить прикладную задачу по определению критерия устойчивости профиля динамического равновесия.

Из существующих методов расчета устойчивости откосов земляных сооружений, применяемых в механике грунтов, наибольшее распространение нашли графоаналитические, основанные на кругло-цилиндрических поверхностях скольжения, которые отображают устойчивость крупных грунтовых массивов, и не рассматривают местную устойчивость частиц грунта на откосе.

Существующие зависимости для допускаемых неразмывающих скоростей и допустимой (критической) влекущей силы также не учитывают влияние гидродинамических характеристик волнового потока на состояние устойчивости откоса. Поэтому для анализа воздействия комплекса сил, действующих на элемент грунта, находящийся на поверхности береговой отмели в волновом потоке, был использован метод оценки предельного состояния откоса. Этот метод дает возможность на основе учета действующих сил оценить местную устойчивость профиля равновесия [Levkevich E.M. 1979; Levkevich V.E. 1984; Levkevich V.E. 2018].

Такой подход при анализе позволил разработать авторам критерии устойчивости склонов при разных стадиях развития деформаций откоса [Levkevich V.E. 2018]. Кроме того, профессором Э.И. Михневичем был получен критерий устойчивости откоса с креплением каменной отсыпкой, а А.В. Бузуком – критерий устойчивости откоса под разрушенным бетонным креплением [18]. Структура полученных в результате экспериментальных натурных и лабораторных исследований научно обоснованных критериев приведены ниже в таблице 2.

Таблица 2.

Критерии устойчивости верховых откосов дамб из несвязных грунтов

№ п/п	Критерий устойчивости	Авторы-разработчики	Условия применения
1	$\Pi_1 = \frac{\rho'_0 (mf - 1)d}{h + ah_{1\%} f \sqrt{1 + m^2}}$	Михневич Э.И., Левкевич В.Е. [2018]	Начальная стадия развития профиля
2	$\Pi_2 = \frac{\gamma dfm}{\sqrt{\xi_1^2 + 0,25\xi_2^2}}$	Левкевич В.Е. [2018]	Заключительная стадия развития профиля равновесия

3	$\Pi_3 = \frac{\gamma_1 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}$	Михневич Э.И. [2018]	Профиль равновесия с креплением каменной наброской
4	$\Pi_{\text{К}} = \frac{\rho_s (mf - 1) d}{\left[\frac{0,02v^2}{2g} + 0,27(1 - n_s) h_0 f \right] \sqrt{1 + m^2}}$	Бузук А.В. [2016]	Профиль равновесия откоса под реплением из желез-обетонных плит с открытыми швами

Источник: [Михневич Э.И., Левкевич В.Е. 2018; Бузук А.В. 2016].

Source: [Михневич Э.И., Левкевич В.Е. 2018; Бузук А.В. 2016].

На стадиях формирования устойчивого откоса, а это первые 3–5 лет после заполнения водоема, величина Π_1 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 $\Pi_1 \geq 1$.

На заключительной стадии – стадии стабилизации, характеризуемой затуханием процесса деформаций во времени происходит развитие вдольберегового перемещения материала переработки вдоль уреза воды при котором критерий устойчивости откоса приобретает совершенно иную форму.

Рассмотрим условия устойчивости грунтового откоса, покрытого желез-обетонным покрытием с нарушенной структурой, при воздействии волнового потока. Рассмотрим случай ската волны с откоса.

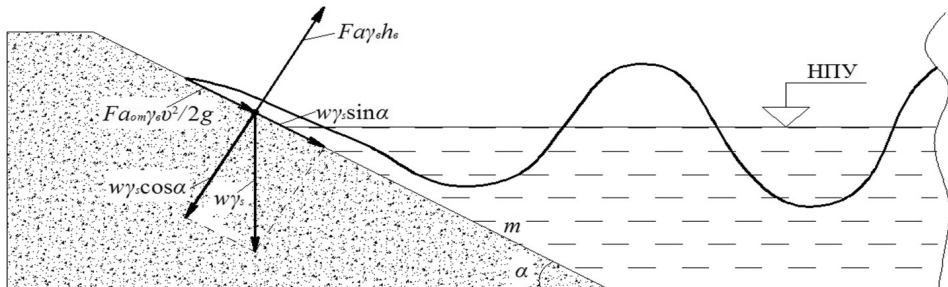


Рис. 11. Схема сил, действующих на элемент грунта на откосе при откате волны

Fig. 11. Scheme of forces acting on a soil element on a slope during wave rollback

Источник: [Михневич Э.И., Левкевич В.Е. 2018; Бузук А.В. 2016].

Source: [Михневич Э.И., Левкевич В.Е. 2018; Бузук А.В. 2016].

На элемент грунта, расположенный на откосе под углом α к горизонту, действуют следующие силы (рисунок 11):

- сила тяжести элемента грунта $w\gamma_s$, где w – объем элемента грунта, м^3 ; γ_s – удельный вес частиц грунта Н/м^3 ;
- сила, создаваемая поверхностным потоком при откате волны, $Fa_{\text{от}}\gamma_b v^2/2$, где F – площадь элемента грунта, м^2 ; γ_b – удельный вес воды, Н/м^3 ;

- v – скорость поверхностного потока, м/с; $a_{от}$ – коэффициент воздействия скоростного напора на элемент грунта; g – ускорение силы тяжести, м/с²;
- волновая взвешивающая сила $Fa\gamma_B h_B$, где h_B – расчетная высота волны, 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/м³;
- сдвигающая составляющая силы тяжести $w\gamma_s \sin \alpha$, Н/м³.

Приравнивая сдвигающие и составляющие силы с учетом коэффициента внутреннего трения грунта f , получим уравнение предельного равновесия в следующем виде:

$$w\gamma_s \sin \alpha + \frac{Fa_{от}\gamma_B v^2}{2g} = (w\gamma_s \cos \alpha - Fa\gamma$$
 (6)

Разделив левую и правую части уравнения (6) на $F\sin \alpha$, получим:

$$d\gamma_s + \frac{a_{от}\gamma_B v^2 \sqrt{1+m^2}}{2g} + a\gamma_B h_B f \sqrt{1+m^2} = d\gamma_s m f$$
 (7)

где $d=w/F$ – диаметр частиц грунта, м; $m=\operatorname{ctg} \alpha$ – коэффициент заложения откоса.

Разделив уравнение (7) на $d g \rho_B$, получим:

$$\frac{\rho_s}{\rho_B} + \frac{a_{от} v^2 \sqrt{1+m^2}}{2gd} + \frac{a h_B f \sqrt{1+m^2}}{d} = \frac{\rho_s m f}{\rho_B}$$
 (8)

где ρ_s, ρ_B – плотность соответственно частиц грунта и воды, кг/м³.

Обозначим $\rho_s/\rho_B = \rho'_s$ (относительная плотность частиц грунта) и умножим уравнение (8) на d , тогда после преобразований уравнение (8) примет вид:

$$\left(\frac{a_{от} v^2}{2g} + a h_B f \right) \sqrt{1+m^2} = \rho'_s (m f - 1) d$$
 (9)

Отношение правой части уравнения (9) к левой представляет собой критерий устойчивости откоса Π_k (в том числе закрепленного плитами), который при средних значениях коэффициентов $a=0,27(1-n_s)$ и $a_{от}=0,02$ имеет вид:

$$\Pi_k = \frac{\rho'_s (m f - 1) d}{\left[\frac{0,02 v^2}{2g} + 0,27(1-n_s) h_B f \right] \sqrt{1+m^2}}$$
 (10)

Устойчивость откоса обеспечивается при соблюдении критерия P_k , равного $P_k \geq 1$, при котором форма откоса с креплением плитами с нарушенной структурой приобретает контур профиля динамического равновесия, принятого для расчетного типа грунта.

Заклучение

В результате анализа деформаций и разрушений креплений откосов в натуральных и лабораторных условиях, изучения распределения вынесенного материала обратного фильтра, было установлено что для водохранилищ, расположенных на территории Беларуси, существуют три схемы потери устойчивости берегоукрепительных сооружений. Полученные схемы соответствуют стадиям разрушения креплений, установленных автором в результате многолетних натуральных и лабораторных исследований.

Разработанная упрощенная модель переноса на основе уравнения Лапласа для учета распределения скоростей стоковых течений пригодна для расчета скоростных структур потоков, влияющих на разрушение береговой линии при исследовании продольной устойчивости откосов и их креплений.

Анализ материалов экспериментальных лабораторных и натуральных исследований устойчивости креплений откосов, а также численное моделирование распределения внутриводоемных стоковых и вдольбереговых течений позволили: предусмотреть крепление береговых склонов с учетом геологического строения берегов, характеристик грунтов и режима эксплуатации водохранилища Витебской ГЭС; выбрать оптимальный вариант берегоукрепления (с точки зрения обеспечения устойчивости и экономической целесообразности); получить за счет проведения комплекса инженерных берегоукрепительных мероприятий положительный экономический эффект (снижение затрат на возведение сооружения).

Обобщение экспериментального материала позволило предложить критерий устойчивости закрепленных откосов, учитывающий возможность возникновения разрушения плит крепления P_k . Принято, что при $P_k \geq 1$ профиль откоса с креплением плитами, деформированными в процессе эксплуатации, приобретает контур профиля динамического равновесия, принятого для расчетного типа грунта в результате разрушения откоса волнением.

При проведении оценки устойчивости различных типов берегоукреплений грунтовых откосов подпорных сооружений и береговых склонов рекомендуется учитывать предложенный автором критерий устойчивости P_k с учетом возможных деформаций покрытий.

Литература

- Бузук А.В., 2018, *Критерий устойчивости откосов подпорных сооружений и берегов водохранилищ с деформированным железобетонным креплением* / А.В. Бузук // Мелиорация, №4(86), с. 24–30.
- Бузук А.В., 2015, *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, № 2 (22), с. 79–86.
- Бузук А.В., 2016, *Исследование устойчивости и эффективности работы берегозащитных сооружений водохранилищ Беларуси с использованием материалов натуральных наблюдений, физического и математического моделирования* / А.В. Бузук, В.Е. Левкевич // БНТУ «Актуальные вопросы экономики строительства и городского хозяйства», с. 112–126.
- Бузук А.В., 2011, *Математическое и гидравлическое моделирование конвективной диффузии загрязнений в русловых водохранилищах* / А.В. Бузук, В.Е. Левкевич, А.А. Новиков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы девятой междунар. науч.-практич. конф., Минск, 20–24 ноября 2011 г.: в 3 т. / БНТУ; редкол.: И.И. Разин [и др.]. Минск, с. 319.
- Водохранилища Беларуси: справочник* / М.Ю. Калинин [и др.]; под общ. ред. М.Ю. Калинина. – Минск: ОАО «Полиграфкомбинат им. Я.Коласа», 2005, 182 с.
- Золоторев Г.С., 1955, *Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки* / Г.С. Золоторев. – АН СССР, Т. 12, с. 188–235.
- Кондратьев Н.Е., 1951, *Расчет ветрового волнения и переформирование берегов водохранилищ* / Н.Е. Кондратьев. – Ленинград : Гидрометеиздат, с. 107.
- Левкевич В.Е., *Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси* / В.Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015, 306 с.
- Левкевич Е.М., 1977, *Из опыта эксплуатации креплений верховых откосов земляных плотин и берегов водохранилищ БССР* / Е.М. Левкевич, Г.П. Сапожников. Минск, с. 97–105.
- Левкевич Е.М., 1971, *Лабораторные исследования переформирования неукрепленных откосов земляных плотин под воздействием волн и фильтрационных сил* / Е.М. Левкевич. – Энергетика, Известия ВУЗов, №8 Минск – БПИ, с. 98–102.
- Левкевич В.Е., 2018, *Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси: монография* / В.Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, с. 143.
- Левкевич В.Е., 1984, *Рекомендации по прогнозированию переработки абразионных берегов малых равнинных водохранилищ, сложенных несвязными грунтами.* / В.Е. Левкевич – Мн: ЦНИИКИВР, с. 38.
- Левкевич Е.М., 1979, *Переработка берегов водохранилищ малой ГЭС.* / Е.М. Левкевич. – Л., с. 226–227.
- Максимчук В.Л., 1981, *Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ* / В.Л. Максимчук. – Киев : Будівельник, с. 112.
- Михневич Э.И., 1988, *Устойчивость русл открытых водотоков* / Э.И. Михневич. – Минск : Ураджай, с. 240.
- Пышкин Б.А., 1973, *Динамика берегов водохранилищ* / Б.А. Пышкин. – Киев: «Наукова думка», с. 416.

- Чеботарев А.И., 1970, Гидрологический словарь / А.И. Чеботарев. – Ленинград : Гидро-метеорологическое издательство, с. 78.
- Шайтан В.С., 1962, Исследование ветровых волн на водохранилище / В.С. Шайтан. – Москва : Гостройиздат .

Bibliography

- Buzuk A.V., *Kriteriy ustoychivosti otkosov podpornukh sooruzheniy i beregov vodokhranilishch s deformirovannum zhelezobetonnum krepleniem* [Stability criterion for the slopes of retaining structures and the banks of reservoirs with deformed reinforced concrete fasteners] *Melioration*. – 2018. – №4(86), pp. 24–30.
- Buzuk A.V., 2015, *Rezul'taty laboratornykh issledovaniy deformatsiy otkosov s beregoukrepitel'nymi sooruzheniyami vodokhranilishch i ikh vliyanie na bezopasnost' ob'ekta v chrezvychaynykh situatsiyakh* [Results of laboratory studies of deformations of slopes with bank protection structures of reservoirs and their impact on the safety of the facility in emergency situations] *Journal of Institute for command engineering Ministry of Emergencies Republic of Belarus*, № 2 (22), pp.79–86 (rus).
- Buzuk A.V., Levkevich V.E., 2016, *Issledovanie ustoychivosti i effektivnosti raboty beregozashchitnykh sooruzheniy vodokhranilishch Belarusi s ispol'zovaniem materialov naturnykh nablyudeniy, fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya* [Study of the sustainability and effectiveness of the coastal protection facilities of the reservoirs of Belarus using materials of field observations, physical and mathematical modeling]. *Digest of articles BNTU «Current issues of construction economics and urban economy»*, pp. 112–126 (rus).
- Buzuk A.V., Levkevich V.E., Novikov A.A., 2011, *Matematicheskoe i gidravlichesкое modelirovanie konvektivnoy diffuzii zagryazneniy v ruslovykh vodokhranilishchakh* [Mathematical and hydraulic modeling of convective diffusion of contaminants in channel reservoirs]. *Proc. IX Intern. scientific-practical conf. «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy devyatoy mezhdunar»*, Minsk, November 20–24, BNTU; In 3 parts. Part 1. Ed. by: I.I. Razin et al. Minsk, p. 319 (rus).
- Chebotarev A.I., 1970, *Gidrologicheskiy slovar'* [Hydrological Dictionary] Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, p.p. 78.
- Kalinin M.Yu., 2005, *Vodokhranilishcha Belarusi* [Reservoirs of Belarus] directory. Minsk : OAO «Poligrafkombinat im. Ya.Kolasa», pp. 182 (rus).
- Kondrat'ev N.E., 1951, *Raschet vetrovogo volneniya i pereformirovanie beregov vodokhranilishch* [Calculation of wind waves and reshaping of reservoir banks]. – Leningrad : Gidrometeoizdat, p. 107.
- Levkevich E.M., 1971, *Laboratornue issledovaniya pereformirovaniya neukreplennukh otkosov zemlyanukh plotin pod vozdeystviem voln i filtratsionnykh sil* [Laboratory studies of the reshaping of unreinforced slopes of earth dams under the influence of waves and filtration forces] *Energy, Izvestiya VUZov*, №8 Minsk – BPI, pp. 98–102.
- Levkevich E.M., 1979, *Pererabotka beregov vodokhranilishch maloy GES* [Processing of the shores of reservoirs of a small hydroelectric station]. Leningrad, pp. 226–227 (rus).
- Levkevich E.M., Sapozhnikov G.P., 1977, *Iz opyta ekspluatatsii kreplenykh verkhovukh otkosov zemlyanukh plotin i beregov vodokhranilishch BSSR* [From the experience of

- operating the fastenings of the upper slopes of earthen dams and the banks of reservoirs of the BSSR] Minsk, pp. 97–105.
- Levkevich V.E., 2015, *Dinamicheskaya ustoychivost' beregov vodokhranilishch Belarusi* [Dynamic stability of the banks of reservoirs in Belarus] Minsk : Pravo i ekonomika, p. 306 (rus).
- Levkevich V.E., 2018, *Gidro-morfodinamika pribrezhnoy zony vodokhranilishch GES Belarusi* [Hydro-morphodynamics of the coastal zone of reservoirs of hydropower stations of Belarus] monograph. Minsk : Pravo i ekonomika, p. 143 (rus).
- Levkevich V.E., 1984, *Rekomendatsii po prognozirovaniyu pererabo tki abrazionnykh beregov malykh ravninnykh vodokhranilishch, slozhennykh nesvyaznymi gruntami* [Recommendations for predicting the processing of the abrasion banks of small plain reservoirs composed of loose soils]. Minsk : TsNIIKIVR, p. 38 (rus).
- Maksimchuk V.L., 1981, *Ratsional'noe ispol'zovanie I okhrana beregov vodokhranilishch* [Rational use and protection of the banks of reservoirs] Kiev: Budivelnik, p. 112.
- Mikhnevich E.I., 1988, *Ustoychivost' rusl otkrutukh vodotokov* [Stability of open water-courses] Minsk : Uradgay, p. 240.
- Pyshkin B.A., 1973, *Dinamika beregov vodokhranilishch* [Dynamics of the banks of reservoirs]. Kiev: «Naukova dumka», pp. 416 (rus).
- Shaytan V.S., 1962, *Issledovanie vetrovykh voln na vodokhranilishche* [Study of the wind waves in the reservoir]. Moscow : Goststroyizdat (rus).
- Zolotarev G.S., 1955, *Ingenerno-geologicheskoe izuchenie beregovykh sklonov vodokhranilishch i otsenka ikh pererabotki* [Engineering-geological study of the coastal slopes of reservoirs and assessment of their processing] AS USSR, Part.12, pp. 188–235.

Summary

Purpose. The article is devoted to experimental studies of the stability of the banks of reservoirs and coast protection structures.

Methods. On the projected coast of the reservoir, the mode of runoff currents was modeled to determine the most overloaded sections.

Findings. The zones of influence on the coastal slopes of the channel reservoirs of the elongated form of runoff intrawater and wind-wave currents are considered. The results of modeling the mode of intra-aquatic flows are visualized. The proposed measures for the engineering protection of the banks of the reservoir.

Application field of research. The obtained experimental data can be used in the design of coast protection structures of the banks of reservoirs.

Conclusions. A simplified transfer model based on the Laplace equation has been developed that is suitable for estimating the distribution of runoff flow rates and calculating flow velocity structures that affect coastline destruction when estimating the longitudinal stability of slopes and their coast protection structures. The steadiness criterion of fixed slopes has been developed.