

**КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
ПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ
С ДЕФОРМИРОВАННЫМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КРЕПЛЕНИЕМ**

А.В. Бузук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности,

*Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
г. Минск, Беларусь*

Аннотация

Рассмотрены условия воздействия ветрового волнения на грунтовые верховые откосы подпорных сооружений и естественные берега, имеющие крепление в виде железобетонных плит покрытия с деформациями. Приведены результаты анализа натуральных обследований состояния железобетонных креплений откосов и берегов искусственных водных объектов, а также лабораторных исследований устойчивости креплений, под воздействием ветрового волнения. Предложен критерий для оценки устойчивости грунтовых откосов и береговых склонов, имеющих железобетонное крепление с нарушенной структурой и определены условия его применимости.

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

Abstract

A.V. Buzuk

CRITERION OF SLOPE STABILITY ON THE SUPPORTING STRUCTURES AND RESERVOIRS SHORES WITH DEFORMED REINFORCED CONCRETE FASTENERS

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 of the condition of reinforced concrete fastenings of slopes and shores of artificial water bodies of reservoirs, as well as laboratory studies of the stability of fasteners under the influence of wind waves are presented. 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.

Keywords: reservoir, coast protection structure, modeling, stability 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 натуральных обследований, проведенных с 2007 по 2017 гг., оценена в пределах 44 % (или 110 км) [1].

Деформации креплений верховых откосов земляных дам и плотин, а также берегов водохранилищ из сборных железобетонных и монолитных плит, в виде просадок, трещин, разломов, раскрытия швов, присутствуют на всех обследованных водных объектах, а их наличие на берегоукрепительном сооружении ведет к разрушению напорного откоса и в итоге – к потере общей устойчивости гидротехнического подпорного сооружения с развитием гидродинамической чрезвычайной ситуации.

Устойчивость откоса с железобетонным креплением с нарушенной структурой в условиях волнового воздействия

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 рис. 1 приведены характерные повреждения берегоукрепительных сооружений, зарегистрированные на водохранилищах Беларуси.

Автором в результате многочисленных лабораторных экспериментов, а также длительных многолетних натуральных 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 (рис. 2) [2].



Водохранилище «Лепельское»



Водохранилище «Волпа»



Водохранилище «Острошицкий Городок»



Водохранилище «Чигиринское»

Рисунок 1 – Типичные повреждения креплений откосов и берегов

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

- 1) НПУ находится ниже разрушенного заполнения межплиточных швов;
- 2) НПУ находится в нижней части плит с разрушенными заполнениями межплиточных швов;
- 3) НПУ находится в верхней части плит с разрушенными заполнениями межплиточных швов.

Наиболее распространенными схемами разрушения крепления берегов в условиях Беларуси являются:

- разрушение межплитных швов в результате воздействия комбинированных нагрузок (волнение, колебание уровней и т. д.);
- вымыв подготовки и грунта, образующего тело откоса из-под плит крепления и частичное их обрушение;
- полное разрушение крепления при отметках верхнего бьефа, близких к отметкам нормального подпорного уровня (НПУ), и нарушение общей устойчивости подпорного сооружения, определяющееся

протяженностью участка разрушения по фронту. Последняя схема является самой опасной.

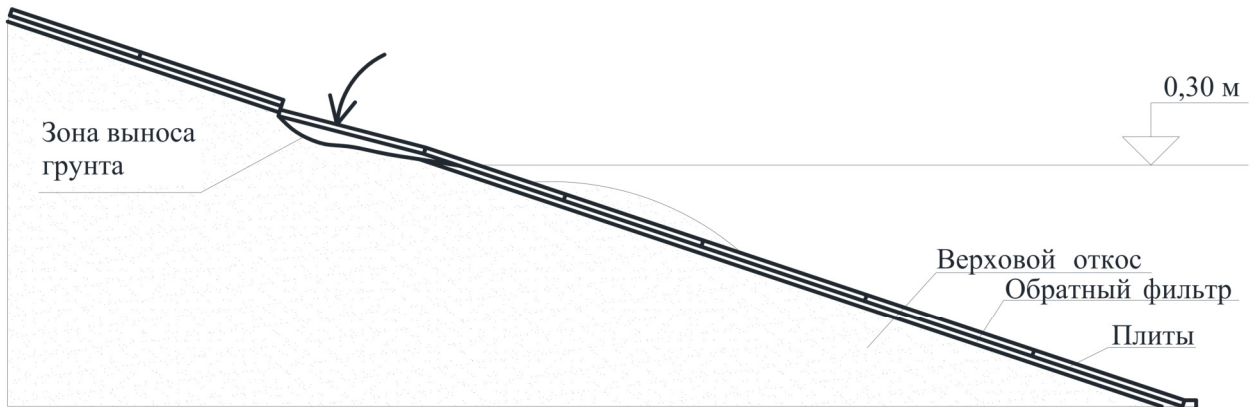
Разрушение крепления откосов и берегов в условиях водохранилищ Беларуси проходит ряд временных стадий, которые были выделены автором в соответствии со схемами, приведенными выше (рис. 3).

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

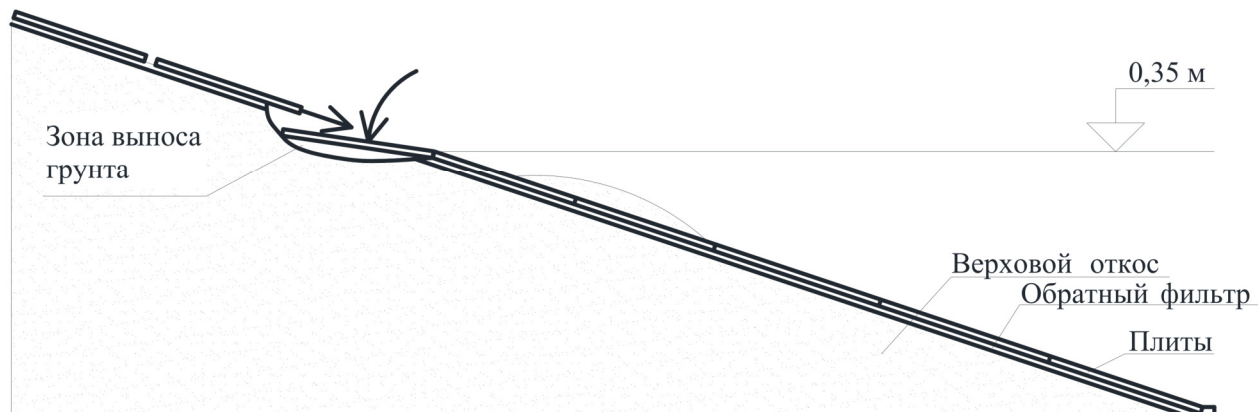
- недостаточно полный учет условий эксплуатации водохранилищ Беларуси, связанный с изменениями характера регулирования, что влияет на уровеньный режим водного объекта и режим волнения [2, 3];
- инженерные расчеты, использующие укрупненные расчетные схемы и зависимости, разработанные для морских условий 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.);

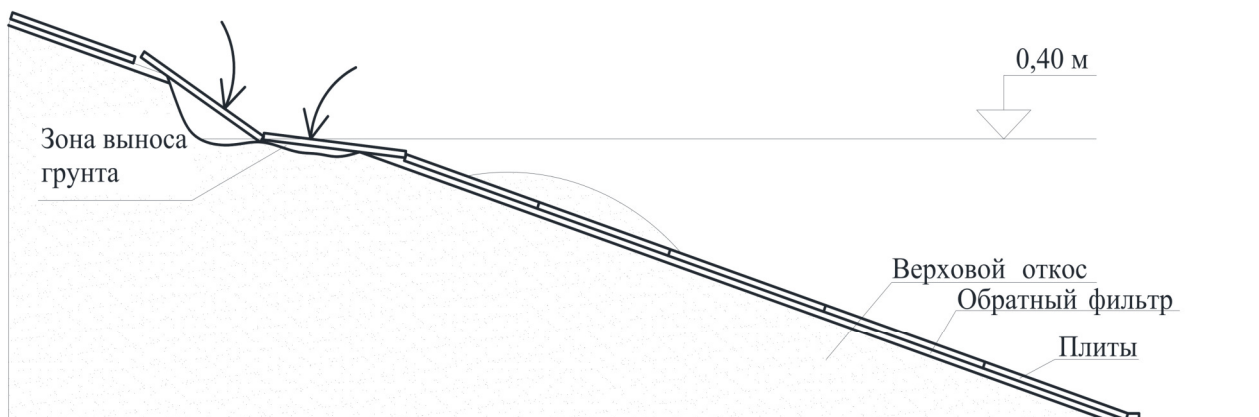
– отсутствие отдельной эксплуатационной службы и системы мониторинга состояния сооружений гидроузла.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Схемы потери устойчивости крепления откоса (по данным натурных и лабораторных исследований):

а – оседание плиты выше уреза воды; б – оседание плиты выше уреза воды и сползание плиты над ней; в – обвал плиты выше уреза воды и плиты над ней



1)



2)



3)

Рисунок 3 – Стадии разрушения крепления откосов:

- 1) разрушение – раскрытие швов; 2) вымыв грунта и разрушение подготовки – обратного фильтра; 3) обрушение плит крепления по швам, находящимся на отметках, близких к НПУ, где происходит трансформация и опрокидывание волны

Устойчивость берегоукрепительных сооружений водохранилищ определяют: гидродинамическими, гидрогеологическими, климатическими, гидрометеорологическими, геоморфологическими, биологическими и другими факторами и условиями [2–6].

К основным факторам, вызывающим деформации креплений откосов дамб и плотин, а также естественных берегов водных объектов, относятся уровень, 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 [3–7].

В соответствии с [8, 9] 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, 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 – возникает эффект «прижимания» плиты к поверхности откоса [9].

В настоящее время действующим нормативным документом, регламентирующим проектирование и расчет объектов берегоукрепления является ТКП 45-3.04-170-2009, созданный на основе СНиП 2.01.07-85, СНиП II-6-74, СН 92-60. Во всех перечисленных документах рассматривается устойчивость сооружений только с точки зрения распределения нагрузок. При этом практически все основные переменные представлены в виде безразмерных коэф-

фициентов, определяемых табличным способом или с помощью графиков, что с учетом первоначального назначения документа (для крупных водохранилищ) приводит к характеристикам берегоукрепительных сооружений, которые принимаются со значительным запасом.

Схема воздействия и распределения волнового давления по откосу с покрытием из железобетонных плит приведена на рис. 4. 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 (рис. 5).

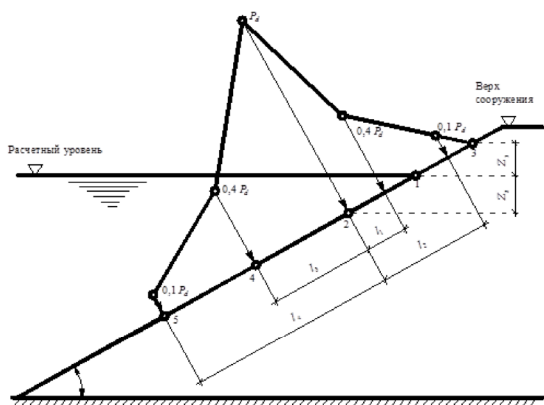


Рисунок 4 – Эпюра максимального волнового давления на откос, укрепленный плитами [10]

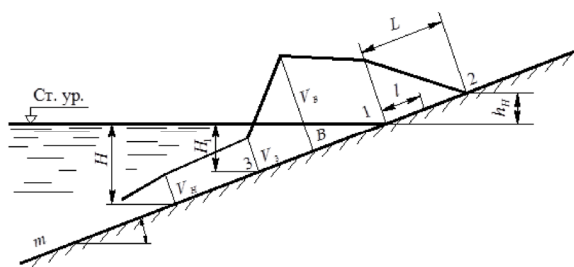


Рисунок 5 – Распределение скоростей волнового потока по откосу [10, 11]

В зоне разрушения и опрокидывания волны величины размывающих скоростей для грунтов подготовки и тела сооружения выше допустимых на размыв (рис. 6, 7), что при наличии открытых швов вызывает вынос грунта из подплиточного пространства, расположенного на отметках, близких к НПУ.

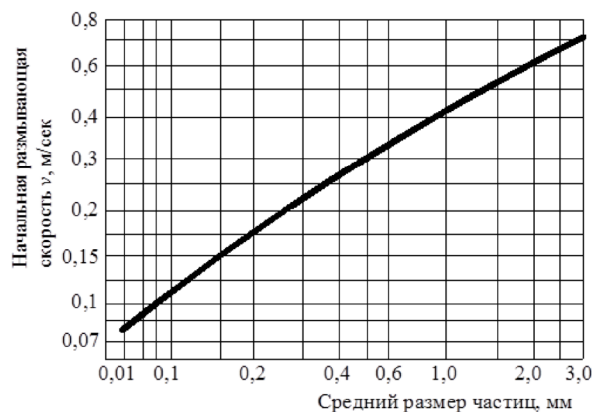


Рисунок 6 – График начальной размывающей волновой скорости для несвязного грунта [5, 10, 11]

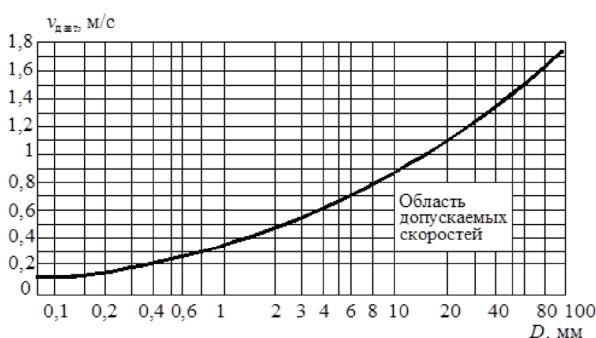


Рисунок 7 – График допустимых значений неразмывающих донных скоростей [5, 10, 11]

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 [3, 4]. При протекающей гидродинамической чрезвычайной ситуации расчетная скорость волнового потока в точках 1, 2 и 3 (см. рис. 5) на размыв для грунта наиболее эффективно будет определяться по [12]:

$$v_1 = \frac{10k_{ш}\sqrt{g}}{2\pi+m} \sqrt[3]{h^2\lambda}; \quad (1)$$

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

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

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

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

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%-й волны; λ – длина волны, м.

Устойчивость откоса в условиях волнового воздействия при откате волны

Рассмотрим условия устойчивости грунтового откоса, покрытого железобетонным покрытием с нарушенной структурой, при воздействии волнового потока в случае ската волны с откоса.

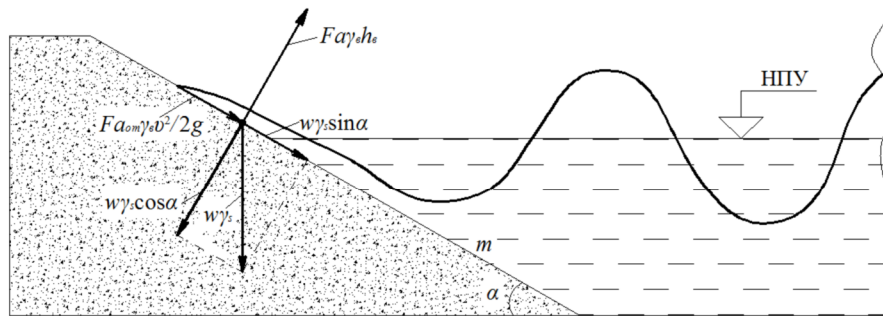


Рисунок 8 – Схема сил, действующих на элемент грунта на откосе при откате волны

На элемент грунта, расположенный на откосе под углом α к горизонту, действуют следующие силы (см. рис. 8):

- сила тяжести элемента грунта $w\gamma_s$, где w – объем элемента грунта, м³; γ_s – удельный вес частиц грунта Н/м³;
- сила, создаваемая поверхностным потоком при откате волны, $Fa_{om}\gamma_e U^2/2g$, где F – площадь элемента грунта, м²; γ_e – удельный вес воды, Н/м³; U – скорость поверхностного потока, м/с; a_{om} – коэффициент воздействия скоростного напора на элемент грунта; g – ускорение силы тяжести, м/с²;
- волновая взвешивающая сила $Fa\gamma_e h_e$, где h_e – 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.

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

$$w\gamma_s \sin \alpha + \frac{Fa_{om}\gamma_e U^2}{2g} = (w\gamma_s \cos \alpha - Fa\gamma_e h_e)f. \quad (6)$$

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

$$d\gamma_s + \frac{a_{om}\gamma_e U^2 \sqrt{1+m^2}}{2g} + a\gamma_e h_e f \sqrt{1+m^2} = d\gamma_s m f \quad (7)$$

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

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

$$\frac{\rho_s}{\rho_w} + \frac{a_{om} U^2 \sqrt{1+m^2}}{2gd} + \frac{a h_e f \sqrt{1+m^2}}{d} = \frac{\rho_s m f}{\rho_w} \quad (8)$$

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

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

$$\left(\frac{a_{om} U^2}{2g} + a h_e f \right) \sqrt{1+m^2} = \rho_s' (m f - 1) d \quad (9)$$

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:

$$\Pi_k = \frac{\rho_s' (m f - 1) d}{\left[\frac{0,02 U^2}{2g} + 0,27(1-n_s) h_e f \right] \sqrt{1+m^2}}. \quad (10)$$

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

Заключение

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.

Обобщение экспериментального материала позволило предложить критерий устойчивости закреп-

ленных откосов, учитывающий возможность возникновения разрушения плит крепления P_k . Принято, что при $P_k \geq 1$ профиль откоса с креплением плитам, 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Водоохранилища Беларуси : справочник / М. Ю. Калинин [и др.] ; под общ. ред. М. Ю. Калинина. – Минск : Полиграфкомбинат им. Я.Коласа, 2005. – 182 с.
2. 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.
3. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 306 с.
4. Золоторев, Г. С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки / Г. С. Золоторев. – Минск : АН СССР, 1955. – Т.12. – С. 188-235.
5. Михневич, Э. И. Устойчивость русел открытых водотоков / Э. И. Михневич. – Минск : Ураджай, 1988. – 240 с.
6. Левкевич, Е. М. Из опыта эксплуатации креплений верховых откосов земляных плотин и берегов водохранилищ БССР / Е. М. Левкевич, Г.П. Сапожников. – Минск, 1977. – С. 97-105.
7. Кондратьев, Н. Е. Расчет ветрового волнения и переформирование берегов водохранилищ / Н. Е. Кондратьев. – Л. : Гидрометеиздат, 1951. – 107 с.
8. Чеботарев, А. И. Гидрологический словарь / А. И. Чеботарев. – Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 78 с.
9. Левкевич, Е. М. Лабораторные исследования переформирования неукрепленных откосов земляных плотин под воздействием волн и фильтрационных сил / Е. М. Левкевич // Изв. вузов. Энергетика. – 1971. – № 8. – С. 98-102.
10. Канарский, В. С. Устойчивость и прочность откосов земляных сооружений / В.С. Канарский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 146 с.
11. Максимчук, В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ / В. Л. Максимчук. – Киев : Будівельник, 1981. – 112 с.
12. Шайтан, В. С. Исследование ветровых волн на водохранилище / В. С. Шайтан. – М. : Гостройиздат, 1962.

Поступила 26.10.2018