

УДК 627.222.5:614.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТА В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Бузук А.В.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: uk007@rambler.ru

Изучено волновое воздействие на верховые откосы водохранилищ. Проведены лабораторные исследования, в результате которых получены значения распределения волнового давления, действующего на крепление откоса и в обратном фильтре. Предложены механизмы потери устойчивости напорных верховых откосов при воздействии волн.

Studied the impact of the wave on the upper slope of the reservoirs. Conducted the laboratory studies, which resulted obtained by the in the distribution of the values wave pressure acting on the structure slope and in reverse filter. Proposed the mechanisms of stability loss of slopes of pressure under the influence of waves.

(Поступила в редакцию 9 июля 2015 г.)

Введение. В настоящее время по различным данным в Республике Беларусь находится в эксплуатации около 150 водохранилищ различного типа с суммарной площадью водного зеркала более 800 км² и объемом 10 км³ [1]. В стране ведется строительство каскадов гидроэлектростанций на реках Неман, Западная Двина, Днепр, Сож. Как известно водохранилища являются потенциально опасными объектами для людей, попадающих в зону воздействия их береговой зоны (подтопления территории, переработка берегов, эрозионные процессы и др.). В связи с этим возникает проблема защиты населения и территорий, окружающей среды от гидродинамических опасных факторов, приводящих к возникновению чрезвычайных ситуаций гидрологического характера. Одним из основных вопросов при этом является оценка состояния естественных защищенных и незащищенных береговых склонов и различных типов креплений.

Для оценки состояния берегоукрепительных сооружений на искусственных водных объектах Беларуси в период с 2007 по 2015 годы были проведены обследования откосов с креплением, дамб и плотин более чем на 90 водохранилищах. Так к примеру повреждение и несвоевременный ремонт крепления на водохранилище Княжеборьевское привело к разрушению напорного фронта и возникновению чрезвычайной ситуации с разрушением гидроузла (рисунок 1).



а) общий вид разрушенного гидроузла

б) разрушение защищенного напорного верхового откоса

Рисунок 1 – Разрушение напорного фронта Княжеборьевского водохранилища

В результате анализа данных натуральных обследований установлено, что естественные деформации берегоукрепления (просадки, трещины, разломы, разрушение швов), состоящего из сборных железобетонных и монолитных плит, присутствуют практически на каждом обследованном водном объекте, а в некоторых сооружениях их наличие указывает на аварийное состояние напорного откоса гидротехнического сооружения. В настоящее время полномасштабные исследования устойчивости сооружений и элементов берегоукрепительных сооружений водохранилищ проводят такие ведущие организации как: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Институт географии РАН, ЗАО «ДАР/ВОДГЕО» и др. Наиболее известными работами по оценке устойчивости откосов являются: Б.А. Пышкина, Н.Е. Кондратьева, Е.М. Левкевича, В.Г. Яковенко, Н.В. Сурмы, Э.И. Михневича и др.

Для изучения характерных повреждений и в целом устойчивости откосов с сооружениями были проведены комплексные исследования, которые включали: натурные обследования состояния верхних откосов с креплением (с формированием базы данных); лабораторные исследования устойчивости плит крепления откосов при одновременном воздействии волнения, колебания уровней и фильтрационных сил, а также устойчивости береговой защиты склонов.

В соответствии с [2] под устойчивостью понимается способность конструкции или сооружения сохранять свои функции, защитные и несущие способности под действием внешних факторов.

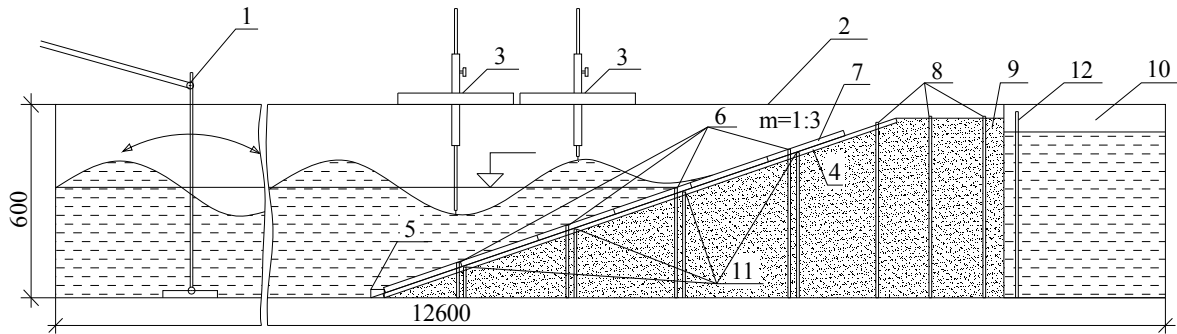
На устойчивость берегоукрепительных сооружений водохранилищ влияют следующие группы факторов: гидродинамические, гидрогеологические, климатические, гидрометеорологические, геоморфологические и другие. Приведенные факторы характеризуются следующими показателями: ветро-волновым и ледовым режимами, вдольбереговым движением наносов, рельефом подводного берегового склона, высотой берега над уровнем воды в водохранилище, формой береговой линии, физико-механическим составом грунтов, просадками, избыточным увлажнением [3].

Оценка устойчивости берегоукрепительных сооружений. Лабораторные исследования устойчивости берегоукрепительных сооружений выполнялись в волновом лотке гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета. Методика исследований включала изучение влияния совместного воздействия высоты волны и уровня режима на интенсивность и масштабы деформаций берегоукрепительных сооружений. Для оценки влияния фильтрации на берегоукрепление при волновом воздействии в откосе моделировался подпор грунтовых вод [4].

Опыт включал (рисунок 2): установку емкости для моделирования грунтовых вод *позиция 10*, отсыпку тела модели среднезернистым песком с заложением верхнего откоса $m=1:3$ *позиция 9*, устройство обратного фильтра из кварцевого песка *позиция 4*, защиту тела модели берегоукрепительным сооружением в виде плиток (между плитками моделировался раскрытый шов шириной 3 см) *позиция 7*. В теле модели располагались три пьезометра для определения фильтрационного давления со стороны емкости с водой *позиция 8*, четыре пары пьезометров для регистрации давления на поверхности модели *позиция 6* и в подплитном пространстве *позиция 11*, кроме того, для моделирования фильтрационного потока в подпорной емкости была установлена мерная трубка *позиция 12*. Измерение высоты гребня волны и впадины производилось при помощи мерных игл *позиция 3*. Давление на поверхности откоса и под плиточном пространстве измерялось при помощи пьезометров и его значения фиксировались на миллиметровой бумаге.

При проведении опыта устанавливался моделируемый уровень воды в лотке и при помощи волнопродуктора изменялась лишь высота волн *позиция 1*. На прозрачной стенке лотка размещалась калька для фиксации параметров вынесенного грунта (S_i и A_i) под плитками (образование надводной полости под берегоукреплением) и нанесенного грунта на плитки под водой (образование подводной отмели) во времени. В то же время проводилась фиксация пьезометрического давления на поверхности откоса и в подплитном пространстве.

Для изучения механизма разрушения защищенного креплением откоса с коэффициентом заложения 1:3 использовались железобетонные плитки размером $0,15 \times 0,3 \times 0,02$ м. Размеры волнового лотка – $12,6 \times 0,6 \times 0,3$ м. Схема модели представлена на рисунке 2.



1 – волнопродуктор; 2 – малый волновой лоток; 3 – мерная игла для определения высоты впадины и гребня волны; 4 – обратный фильтр; 5 – анкер; 6 – пьезометры для измерения давления на поверхности плит крепления; 7 – плитки крепления откоса; 8 – пьезометры в теле плотины для измерения фильтрационного потока; 9 – тело плотины; 10 – подпорная емкость; 11 – пьезометры для измерения давления в подплитном пространстве; 12 – мерная трубка уровня в подпорной емкости

Рисунок 2 – Схема лабораторной установки для определения устойчивости берегоукрепительных сооружений

Опыты производились на размываемой модели откоса, сложенного среднезернистым песком ($d = 0,5$ мм) с коэффициентом заложения верхового откоса равного 1:3.

Геометрический масштаб модели составлял 1:10. Моделирование выполнялось с заранее раскрытыми швами между плитками, имитирующие естественные условия повреждения и их размер составлял 0,03 м по вертикали (0,3 м в натуральных условиях на аварийном водохранилище с учетом масштаба моделирования). Эксперимент включал 18 различных опытов с 5 кратной повторяемостью. Глубина воды в волновом лотке при моделировании изменялась в пределах $H = 0,3, 0,35$ и $0,4$ м. Высота волны при проведении эксперимента составляла $h_w = 0,05, 0,06, 0,07$ и $0,08$ м.

Выбранные параметры откоса и плит крепления соответствовали наиболее распространенным берегозащитным сооружениям и откосам, которые существуют в натуральных условиях. Гранулометрический состав грунта модели откоса с коэффициентом неоднородности грунта $\eta = 4,13 \div 4,84$ и обратного фильтра с коэффициентом неоднородности грунта $\eta = 2,58 \div 3,47$ приведены на рисунке 3.

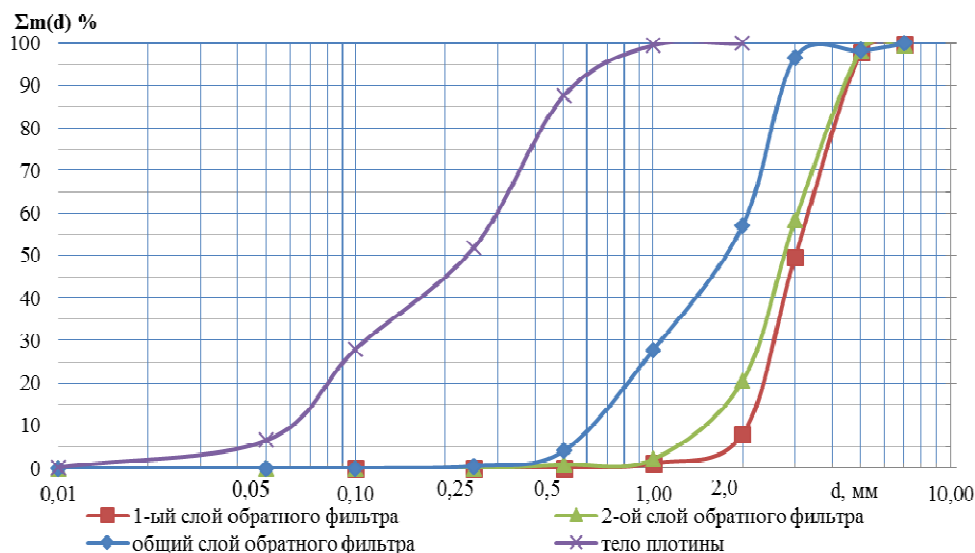


Рисунок 3 – Кривые гранулометрического состава грунта тела плотины и обратного фильтра в волновом лотке

Продолжительность опытов при различных сочетаниях высот волн и глубин в лотке составляла 1,5–60 минут. Окончанием опыта принимался момент потери устойчивости хотя бы одной из плиток крепления откоса, который выражался в перемещении плитки по вер-

тикали на величину, равную ее толщине (b) с учетом среднего диаметра (d_{cp}). При перемещении плитки на такую величину происходило увеличение объема вынесенного грунта в результате появления дополнительной зоны выноса, что приводило к уменьшению времени до потери устойчивости плиток. Результаты фиксировались на кальке, расположенной на стенке лотка. Интервал времени, через который регистрировались измерения по величине линейной переработки (S_t), глубине переработки (A_t), объему вынесенного грунта (Q_t) и гидродинамическому давлению на поверхности плит крепления и под ними (P) до потери устойчивости берегоукрепительного сооружения был различным при различных высотах волн для получения более точных данных при проведении лабораторного эксперимента. Моделирование выполнялось для условий, при которых отношение высоты волны (h_b) к глубине воды в лотке (H) составляло не менее 0,1. В моделируемых условиях отношение составляло: при $H = 0,3$ м и высоте волн $h_b = 0,05 \div 0,08$ м – $0,17 \div 0,27$, при $H = 0,35$ м и высоте волн $h_b = 0,05 \div 0,08$ м – $0,14 \div 0,23$, при $H = 0,4$ м и высоте волн $h_b = 0,05 \div 0,08$ м – $0,13 \div 0,2$. Моделируемые глубины воды и высоты волн в волновом лотке принимались исходя из измерений, полученных в натуральных условиях для существующих искусственных водных объектов. На рисунке 4 показана разработанная номограмма для расчета потери устойчивости плит крепления при выносе из-под них грунта.

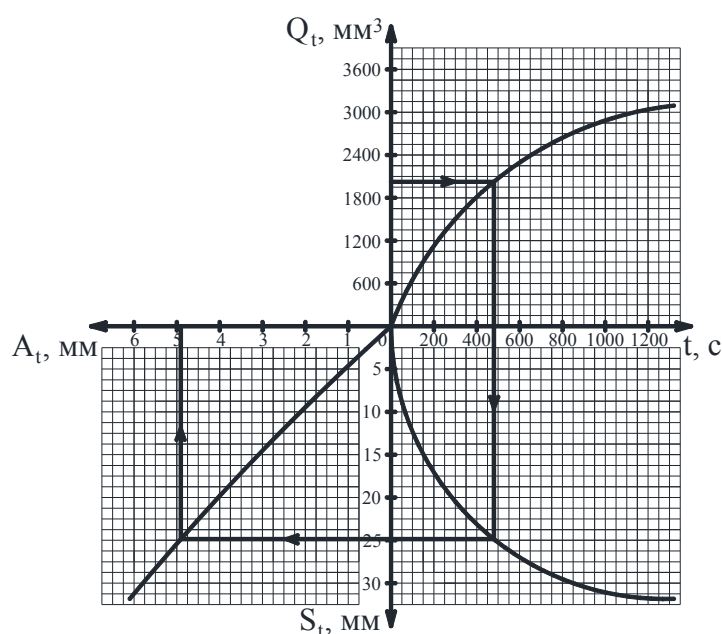


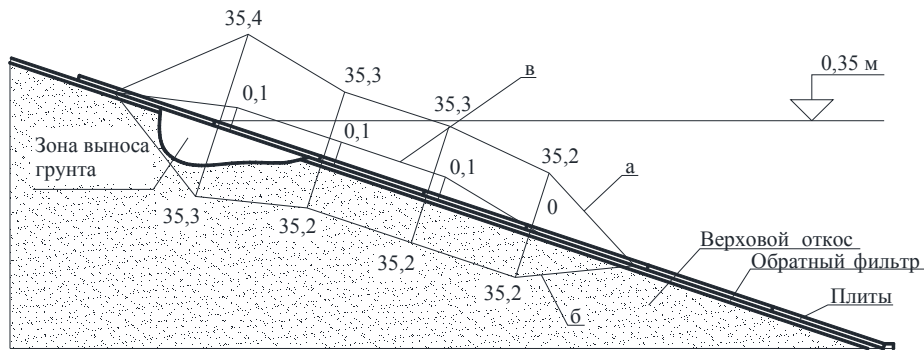
Рисунок 4 – Зависимость деформации модели откоса от времени при $H = 0,35$ м и $h_b = 0,06$ м

В соответствии с представленной на рисунке 4 номограммой выбор значения осуществляется путем размещения точки на одной из кривых и проецированием ее на приведенные шкалы и другие кривые. Следовательно, одному значению будут соответствовать три остальных при выбранном параметре.

Для оценки влияния уровня грунтовых вод и фильтрационного потока на устойчивость берегоукрепительного сооружения в модели со стороны, противоположной напорному откосу, была установлена емкость. В емкость подавалась вода для создания фильтрационного давления со стороны тела модели и моделировалась ситуация, при которой фильтрационный поток был выше уровня воды в лотке (рисунок 2). В частности, превышение уровня воды в емкости составляло 0,05 метра над уровнем воды в лотке. Экспериментальные исследования показали, что при высоком уровне грунтовых вод по отношению к уровню воды в лотке увеличивается время размыва модели и, следовательно, потеря устойчивости берегоукрепительных сооружений происходит через больший промежуток времени.

Таким образом, в результате опытов, были получены эпюры распределения волнового давления на поверхности плиток и под плиточным пространством. По полученным данным

были построены результирующие эпюры давления по откосу модели с креплением. Размерность давления приведена в сантиметрах водяного столба. Эпюры волнового давления на откосе, в подплитном пространстве и результирующее приведены на рисунке 5.



а) давление на откосе; б) давление в подплитном пространстве; в) результирующее волновое давление

Рисунок 5 – Эпюры волнового давления при $H = 0,35$ м и $h_b = 0,06$ м

На рисунке 6 представлен процесс волнового воздействия на верховой откос и разрушение крепления.



Рисунок 6 – Результат волнового воздействия на верховой откос и разрушение крепления при $H = 0,35$ м и $h_b = 0,06$ м

Обсуждение результатов. Таким образом, по результатам натурных наблюдений, были выявлены основные причины, приводящие к нарушению устойчивости берегоукрепительных сооружений. Установлено, что основное влияние на устойчивость береговых склонов гидродинамические факторы оказывают на крупных водных объектах. Профиль

переработки береговой линии малых водохранилищ имеет те же составные элементы, что и на крупных, но вместе с тем присутствуют следующие отличия [4, 5, 6, 7, 8]:

- верхний предел размыва лежит близко к отметке нормально подпорного уровня в связи с незначительными колебаниями воды в водохранилище;
- ширина надводной части береговой отмели относительно мала и изменяется от 0 до 0,1 м реже до 2 м (для различных водохранилищ);
- соотношение отдельных элементов профиля абразии (A_t , B_t) у малых и больших равнинных водохранилищ различно, что определяется различным уровнем режимом.

Анализируя результаты натурных обследований можно сделать вывод, что деформации берегоукрепительных сооружений (просадки, трещины, разломы) присутствуют на большинстве обследованных объектов, а их наличие указывает на предаварийное состояние как напорного откоса гидротехнического сооружения, так и гидроузла в целом. Кроме того, в 50 % обследованных водохранилищ зафиксированы сквозные трещины, деформации швов на всю глубины между плитами и имеются просадки берегоукрепительных сооружений с разрушением горизонтальных швов. Наиболее характерным повреждением берегоукрепительных сооружений является разрушение швов, что сопряжено в дальнейшем с выносом грунта, просадкой плит, появлением сквозных трещин и разломов и, как следствие, происходит разрушение этих сооружений.

На основании проведенных лабораторных исследований и натурных данных были разработаны механизмы потери устойчивости берегоукрепительных сооружений, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механизмы потери устойчивости берегоукрепительных сооружений на лабораторной модели

Показатель уровня воды в лотке, м	Высота волны, м	Потеря устойчивости сооружения на модели		
		время потери устойчивости, с	характер разрушения	примечание
1	2	3	4	5
0,30 (0,35 м со стороны берега)	0,05	—*	Вынос грунта из-под среднего ряда плиток без перемещения последних	Объем вымытого грунта незначительный
	0,06	—*	Вынос грунта из-под среднего ряда плиток без перемещения последних	Объем вымытого грунта незначительный
	0,07	870	Обвал среднего и сползание верхнего рядов плиток в точке соприкосновения	Основной объем вымытого грунта приходится на средний ряд плиток
	0,08	330	Обвал среднего и сползание верхнего рядов плиток в точке соприкосновения	Основной объем вымытого грунта приходится на средний ряд плиток
0,35 (0,40 м со стороны берега)	0,05	3600	Просадка среднего ряда плиток в верхней части	Объем вымытого грунта незначительный и приходится на верхнюю часть среднего ряда плиток
	0,06	1320	Обвал среднего и верхнего рядов плиток в точке соприкосновения	Объем вымытого грунта приходится на средний ряд и нижнюю часть верхнего ряда плиток
	0,07	540	Обвал среднего и сползание верхнего рядов плиток в точке соприкосновения	Объем вымытого грунта приходится на средний ряд и нижнюю часть верхнего ряда плиток
	0,08	600	Обвал среднего и верхнего рядов плиток в точке соприкосновения со сползанием верхнего ряда	Объем вымытого грунта приходится на средний ряд и верхний ряд плиток

Окончание табл. 1

Показатель уровня воды в лотке, м	Высота волны, м	Потеря устойчивости сооружения на модели		
		время потери устойчивости, с	характер разрушения	примечание
1	2	3	4	5
0,40 (0,45 м со стороны берега)	0,05	600	Обвал верхнего ряда и опускание среднего ряда плиток в точке соприкосновения и опрокидывание верхнего ряда в сторону стенки лотка	Объем вымытого грунта приходится на верхний ряд и верхнюю часть среднего ряда плиток
	0,06	625	Обвал верхнего ряда и опускание среднего ряда плиток в точке соприкосновения и опрокидывание среднего ряда в сторону открытого шва	Объем вымытого грунта приходится на верхний ряд и верхнюю часть среднего ряда плиток
	0,07	140	Обвал верхнего ряда и опускание среднего ряда плиток в точке соприкосновения, опрокидывание верхнего и среднего рядов в сторону открытого шва, сползание верхнего ряда под средний	Основной объем вымытого грунта приходится на верхний ряд и верхнюю часть среднего ряда плиток
	0,08	120	Обвал верхнего ряда и опускание среднего ряда плиток в точке соприкосновения, опрокидывание верхнего и среднего рядов в сторону открытого шва, сползание верхнего ряда под средний	Основной объем вымытого грунта приходится на верхний ряд и верхнюю часть среднего ряда плиток

Примечание: * – потеря устойчивости плит крепления не наблюдалась.

Из таблицы видно, что при высоких уровнях воды в лотке и высотах волн быстрее наступает потеря устойчивости берегоукрепительного сооружения. Характер повреждений напорного откоса модели с берегоукреплением в лабораторных исследованиях при больших глубинах (уровнях воды в лотке) и высотах волн показал, что это самый неблагоприятный вариант протекания аварийной ситуации. При этом сокращается время до возникновения чрезвычайной ситуации (Княжеборьевское водохранилище 2010 год рисунок 1) и уменьшается время принятия решения по ее предотвращению. Учитывая данные лабораторных исследований можно сделать вывод, что наибольшей вероятности возникновения аварийной ситуации подвергаются натурные объекты с большой площадью водного зеркала, средними глубинами более 3,0 метров и при скорости ветра, способной образовывать волны высотой не менее 0,7 метров.

В результате сравнения распределений давления и нагрузок на откос модели берегоукрепительного сооружения установлено, что для водохранилищ, расположенных на территории Республики Беларусь, результаты, полученные при проведении лабораторного моделирования, отличаются от эпюр, полученных Левкевичем Е.М., Шайтаном В.С., Канарским В.Ф., Сурмой Н.В., Михневичем Э.И., а также методики, изложенной в ТКП 45-3.04-170 отличаются в меньшую сторону. Полученные в результате лабораторного исследования данные показывают, что параметры распределения давления на откос в зоне трансформации волны – ниже принятых к расчету в существующих методиках. Соответственно, при защите откоса малого водохранилища берегоукрепительными сооружениями с геометрическими параметрами, рассчитанными по существующим методикам как для крупных, запас прочности данных сооружений будет избыточным. Исходя из значений распределения давления по поверхности откоса, полученных при проведении лабораторного исследования, можно скорректировать или уменьшить такой геометрический параметр защитных сооружений как толщина плит берегоукрепления либо слоя бетона при строительстве монолитных укреплений.

Заключение. В результате проведенных исследований на модели откоса, защищенного берегоукрепительным покрытием в виде плит крепления, получены эпюры давления на поверхности откоса и в подплитном пространстве, а также результирующие значения давления, отличные от существующих исследований. Проведена систематизация и составлено описание механизма разрушений берегоукрепительных сооружений в лабораторных условиях. Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров берегоукрепительных сооружений, определении механизмов потери устойчивости на существующих объектах и реагировании на аварии в естественных условиях для защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водохранилища Беларуси: справочник / М.Ю. Калинин [и др.]; под общ. ред. М.Ю. Калинина. – Минск: ОАО «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа», 2005. – 182 с.
2. Чеботарев, А.И. Гидрологический словарь / А.И. Чеботарев. – Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, – 1970. – 78 с.
3. Золоторев, Г.С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. / Г.С. Золоторев. – АН СССР, 1955. – Т.12. – С. 188-235.
4. Михневич, Э.И. Устойчивость русл открытых водотоков. / Э.И. Михневич. – Минск: Ураджай, 1988. – 240 с.
5. 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.
6. Кондратьев, Н.Е. Расчет ветрового волнения и переформирование берегов водохранилищ. / Н.Е. Кондратьев. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1951. – 107 с.
7. Левкевич, В.Е. Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич – Минск: Право и экономика, 2015. – 202 с.
8. Сурма, Н.В. Устойчивость плит крепления нижних бьефов водосборных сооружений мелиоративных систем: автореф. дис. ... канд. технич. наук: 06.01.02 / Н.В. Сурма; НИИ мелиорации и водного хозяйства – Минск, 1986. – 22 с.