

согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, с гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

Расчетные методики были использованы при определении расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на реках Березина и Сож, Днепр и Неман.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сухинов А.И., Сидорякина В.В. Построение и исследование корректности математической модели транспорта и осаждения взвесей с учетом измерения рельефа дна // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Т. 18. – №. 4.
2. Лещев А.В. Влияние судоходного канала порта архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смещения «река–море» устья реки Северной Двины // Проблемы региональной экологии. – 2018. – №. 2.
3. Хорванский А.Д., Латун В.В., Хорошев О.А., Денисов В.И. Оценка воздействия на окружающую среду углубления и расширения судоходных каналов в дельтах рек // Естественные науки. – 2018. – №. 1.
4. Зиновьев Е.А., Китаев А.Б. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Полезные ископаемые – 2015. – Т. 17. – №. 5.
5. Haimann M. et al. Monitoting and modelling concept for ecological optimized harbor dredging and fine sediment disposal in large rivers // Hydrobiologia. – 2018. – Т. 814. – №. 1. – С. 89-107.
6. Vogt C., Peck E., Hartman G. Dredging for Navigation, for Environmental Cleanup, and for Sand/Aggregates // Handbook on Marine Environment Protection. – Springer, Cham, 2018. – С.189-213.

УДК: 532.543

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВОЛНЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО СУХОМУ РУСЛУ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ ПРИ ПРИЗМАТИЧЕСКОМ ПРОРЫВЕ ПЛОТИНЫ

Стриганова М.Ю., Шаталов И.М., Щербакова М.К.,

Максимович А.В., Калиновский И.В.

Белорусский национальный технический университет

Введение

Причинами разрушения грунтовых плотин являются – сейсмические воздействия; фильтрация воды через тело плотины, перелив воды через гребень плотины; аварийное её состояние; неэффективная работа дренажа и др.

Сценарии развития гидродинамической аварии различны. Возможно нарушение целостности подпорного сооружения (образование прорана) в теле плотины, размеры которого существенно меньше общей длины напорного фронта и меньше или равны высоте сооружения, или полное его разрушение. В результате данной чрезвычайной ситуации возникают волны перемещения, определение основных параметров которых (скорости, глубины потока) является весьма актуальной задачей.

В условиях высокогорья уклон дна как сухого русла, так и русла водотока (10–20 м/км) значительно превышает уклон равнинных русел (1 м/км). Высокогорный рельеф при разрушении плотин способствует возникновению бурного потока, движущегося с большой скоростью и сносящего все на своем пути. Опасность появляющейся при этом волны перемещения обусловлена и тем, что она захватывает грунт, составлявший тело размывтой плотины, и различные скальные породы сухого русла, что увеличивает ее ударную силу.

При развитии любого сценария аварии происходит относительно постепенное опорожнение водохранилища, при котором расход воды при распространении потока по нижнему бьефу грунтовой плотины уменьшается в начальном и увеличивается в конечном створе. Для определения основных параметров такого потока были проведены лабораторные исследования в гидродинамическом лотке кафедры ГЭС ВТГ БНТУ.

Основная часть

Лабораторный метод исследования на моделях используется достаточно давно при проектировании, строительстве и эксплуатации разнообразных инженерных сооружений. Конечная цель данного эксперимента при переносе его результатов на натуральный объект (высокогорную грунтовую плотину) – оценка возможных последствий, обусловленных распространением волны перемещения, которая возникает при разрушении этого объекта.

Тестовым объектом исследования было выбрано Тахтакорпюнское водохранилище на территории Азербайджана, созданное одной из наиболее высоких земляных плотин не только в регионе, но и в Европе. Располагается данное сооружение на высоте около 140 м над долиной с жилой застройкой и сетями энергоснабжения, водоснабжения и транспортного сообщения. Протяженность склона от плотины составляет 2,32 км (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Плотина Тахтакорпюнского водохранилища

Провести натурные эксперименты на подобных объектах не представляется возможным. Поэтому лабораторные исследования являются самым оптимальным методом определения необходимых параметров водных потоков при гидродинамической аварии. Был проведен количественный эксперимент, который позволил зафиксировать волну перемещения и определить геометрические и кинематические ее параметры. Гидравлические сопротивления, шероховатость дна, аэрация потока и волнообразование не учитывались в связи с большой инерционностью горного потока.

Для проведения лабораторных экспериментов на первом этапе были определены критерии подобия, которые учитывались при разработке модели тестового сооружения. Были выбраны критерии геометрического и динамического подобия, равенство которых для природы и модели обеспечивает возможность пересчета полученных экспериментальных значений исследуемых параметров потоков для натуральных условий.

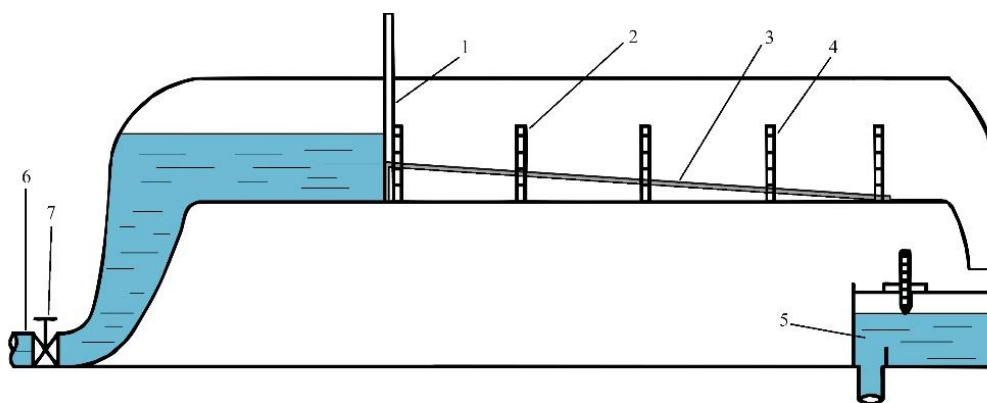
Динамическое подобие выражается через число Фруда, Fr :

$$Fr_{\text{мод}} = Fr_{\text{нат}} = \frac{v^2}{gh}. \quad (1)$$

Геометрическое подобие определено геометрическими размерами согласно модели (рисунок 2):

$$\frac{m_{\text{мод}}}{L_{\text{мод}}} = \frac{m_{\text{нат}}}{L_{\text{нат}}}. \quad (2)$$

Эксперименты проводили в лаборатории Белорусского национального технического университета в прямооточном гидравлическом лотке шириной 0,245 м с прозрачными стенками (рисунок 2). Поток снимали неподвижной камерой.



1 – подвижный затвор; 2 – уровенные рейки (мерные линейки); 3 – модель сухого русла; 4 – гидравлический лоток; 5 – металлический лоток с водосливом Томсона; 6 – питающая труба; 7 – задвижка

Рисунок 2 – Схема экспериментального лабораторного стенда

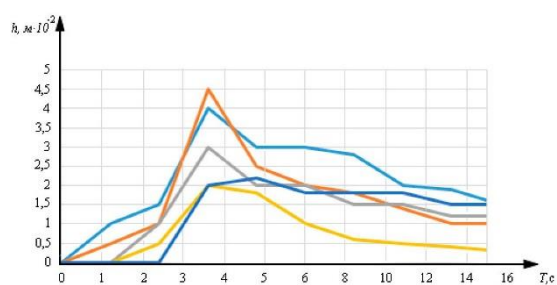
Вода в гидравлический лоток 4 подавалась из водооборотного бассейна насосом по питающей трубе 6. Уровень воды (напор) в лотке регулировался

затвором 7. Вода, поступающая в лоток, накапливалась перед подвижным затвором 1. Установленный уровень соответствовал нормальному подпорному уровню (НПУ) водохранилища перед плотиной. Затвор 1 имел возможность перемещения в вертикальной плоскости, что позволило смоделировать аварию на гидротехническом сооружении с образованием волны перемещения. Из гидравлического лотка вода сбрасывалась в водоприемный лоток 5, в котором был установлен измерительный водослив Томсона для определения расхода воды [2]. Далее вода снова поступала в водооборотный бассейн.

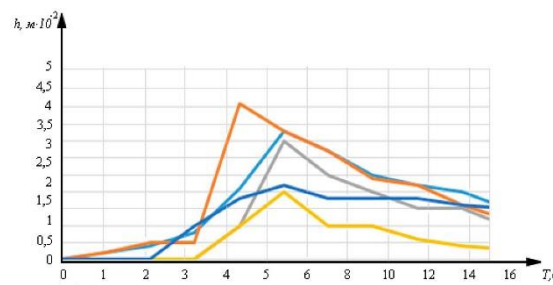
На дно лотка, под нижней гранью затвора 1, была установлена модель сухого русла в масштабе 1:1000, расположенного в нижнем бьефе имитационной модели гидротехнического сооружения. Лоток по длине модели сухого русла был разделен на участки мерными линейками (уровенные рейки) 2 для измерения глубины движущегося потока. Места установки уровенных реек считались измерительными створами. Первый створ располагался в месте расположения затвора 1. По результатам видеосъемки определялись визуальные показания на уровенных рейках и фиксировалось перемещение потока воды (т.е. волны перемещения) в створах до и после поднятия затвора 1.

Эксперименты были проведены при различных временных интервалах подъема затвора 1 (от 2 до 15 с или мгновенно), что соответствовало различным сценариям разрушения плотины: от возникновения прорана вдоль основания плотины до полного ее исчезновения.

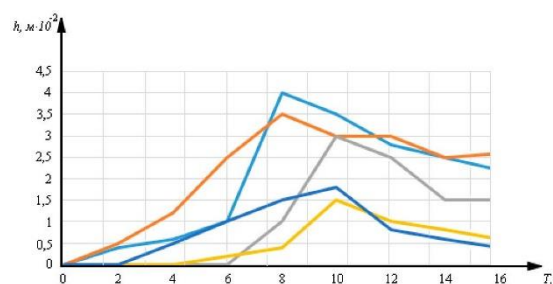
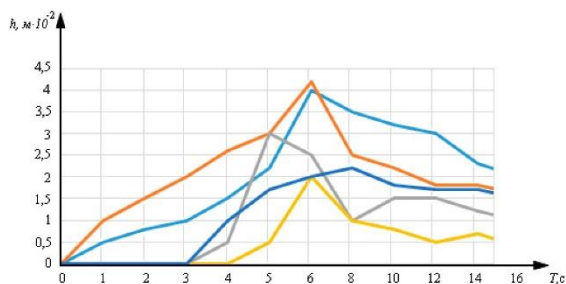
Всего было определено шесть серий экспериментов с пятикратным повторением каждой серии. Далее была проведена обработка результатов измерений и наблюдений, для того чтобы в дальнейшем провести сопоставление с результатами теоретических расчетов и уточнить количественные значения полученных параметров. По результатам были построены графики зависимостей $h = f(T)$, что соответствовало изменению глубины потока воды h (высоты волны перемещения) в зависимости от времени движения потока T в нижнем бьефе модели при различном времени открытия затвора (рисунок 3).



а – открытие затвора 2 с



б – открытие затвора 4 с



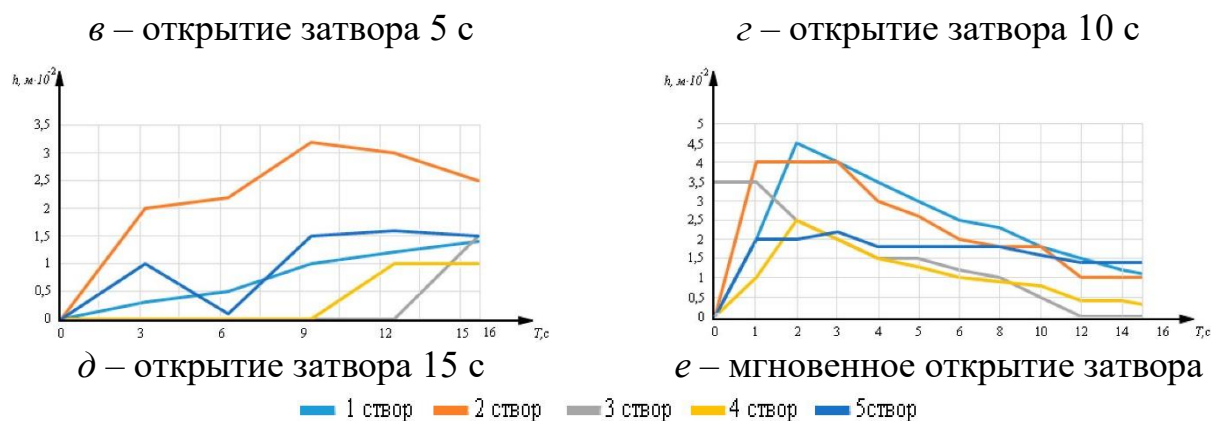


Рисунок 3 – График изменения глубины потока воды h (высоты волны перемещения) в зависимости от времени перемещения потока T в нижнем бьефе модели при различном времени открытия затвора

Видеонаблюдение и анализ построенных графиков показывает, что в начальный момент времени перемещения потока воды на участке, расположенном на некотором расстоянии от подвижного затвора, происходит довольно резкое увеличение глубины (и, соответственно, массы или расхода) вытекающего потока воды (рисунок 3 *a–d*). Затем вода стекает по крутому склону лотка, находясь в бурном состоянии, со значительным уменьшением глубины h и увеличением средней скорости v потока (рисунок 4). Это свидетельствует о появлении прямой отрицательной волны перемещения, о которой упоминалось в ранее опубликованных работах [3; 4]. Здесь следует отметить, что при мгновенном открытии подвижного затвора I (что соответствует полному разрушению земляной плотины) появлялась прямая положительная волна перемещения с резким уменьшением глубины в начальном сечении и мгновенным растеканием бурного потока (рисунок 3 *e, б*).



Рисунок 4 – Общий вид волны перемещения при мгновенном открытии затвора

При движении по наклонной поверхности (горному склону) поток всегда находится в бурном состоянии, а волна перемещения обладает максимальной скоростью и огромной разрушительной способностью. Далее, достигнув горизонтальной плоскости в гидродинамическом лотке, поток переходит в спокойное состояние; при этом появляется обратная положительная волна (рисунок 5), у которой глубина увеличивается, что в природных условиях приведет к затоплению окружающей территории и дополнительным локальным разрушениям в водоворотной зоне.



Рисунок 5 – Общий вид обратной волны

Заключение

Проведение лабораторных модельных исследований потока, движущегося по наклонной плоскости, имитирующей нижний бьеф в виде сухого русла высокогорной плотины при гидродинамической аварии, позволило описать процесс формирования волны перемещения при различных сценариях разрушения сооружения.

Экспериментальная модель движения волны перемещения визуально подтвердила рассмотренные ранее теоретические исследования [3; 4] об имеющей место прямой отрицательной волне при протекании потока по наклонному склону вследствие опорожнения водохранилища и обратной положительной волне ниже склона вследствие торможения потока. Однако при мгновенном открытии подвижного затвора (что соответствует полному разрушению земляной плотины) появлялась прямая положительная волна перемещения с резким уменьшением глубины в начальном сечении и мгновенным растеканием бурного потока.

Полученные экспериментальные данные будут использованы для сопоставления с результатами теоретических расчетов для оценки возможностей и достоверности выбранного метода численного моделирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стриганова, М.Ю. Аспекты теоретических и экспериментальных исследований движения водных потоков при прорыве плотин / М.Ю. Стриганова, С.А. Самедов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 4. – С. 493–500. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.493. – EDN: YPMHSP.
2. Бонч-Осмоловская, Н.Е. Механика жидкости и газа. Лабораторный практикум: учеб. пособие / Н.Е. Бонч-Осмоловская [и др.]; под ред. И.В. Качанова и В.Н. Юхновца. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: БНТУ, 2007. – 295 с.
3. Стриганова М.Ю. Математическая модель пространственно изменяющегося неустановившегося движения потока при прорыве напорных гидротехнических сооружений в условиях высокогорья / М.Ю. Стриганова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 48–58. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.48. – EDN: KGXUEV.

4. Стриганова М.Ю. Об интегрировании дифференциальных уравнений неустановившегося постепенно изменяющегося движения потока в открытом русле в условиях высокогорья при прорыве плотины / М.Ю. Стриганова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 328–334. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.328. – EDN: ВВННОВ.

УДК 621.1.016:536.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ БАРЖЕ- БУКСИРНЫХ СОСТАВОВ НА ВОДОТОКАХ БЕЛАРУСИ

*профессор, д т. н И.В. Качанов, доцент, к. т. н В.А. Ключников научный
сотрудник НИЛ ОМД С.А. Ленкевич., студент Климович В.А., студент Махнач Н.А.
Белорусский национальный технический университет*

Введение

Один из основных принципов рациональной эксплуатации составов судов состоит в наиболее эффективном использовании режимов движения в различных условиях плавания, что становится возможным лишь в том случае, если достаточно точно известны силы сопротивления среды движению судов при определенных условиях [1–3].

Сопротивление состава судов можно определить как по аналитическим выражениям, так и с помощью натурных и модельных испытаний. Наиболее полную и достоверную картину можно получить с помощью модельных испытаний в опытовых бассейнах или гидродинамических лотках.

Кроме того, развитие техники на данном этапе позволяет изготавливать модели с высокой точностью относительно теоретического чертежа благодаря применению 3D печати.

Гидродинамическое взаимодействие судов в составе оказывает существенное влияние на обтекание каждого судна в зависимости от места расположения его в составе, а также от формы и размеров последнего.

Основная часть

При выполнении научно-технического договора между кафедрой «ГЭСВТГ» БНТУ и ОАО «Белсудопроект» были проведены оценочные расчеты силы сопротивления движению барже-буксирных составов (буксир-толкач проекта 570 и баржа 775). Основные результаты расчета представлена в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Основные результаты расчёта силы сопротивления движению барже-буксирного состава в режиме буксировки

№ п/п	Наименование параметра	Численные значения параметра						
1	Скорость судна, км/ч	5,44	5,99	6,53	7,62	8,71	9,80	11,97