

2. Gurbanguly, Berdimuhamedow. Garaşsyzlyk-bagtymyz / Berdimuhamedow Gurbanguly. – А.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2021.

3. Сапаров, У. Б. Туркменское озеро в пустыне Каракумы / У. Б. Сапаров, В. Г. Голубченко. – А.: Туркменгосиздат, 2020.

4. Hojamyradow, G. Suwarmaguy esaslary / G. Hojamyradow. A. Mämmedow. – А.: Magaryf, 2004.

5. Бабаев, А. Г. Преобразование пустынь и опустынивание / А. Г. Бабаев, – А.: Туркменгосиздат. 2012.

УДК 532.543

### **О гидродинамической аварии при прорыве плотины в условиях высокогорья**

Стриганова М. Ю.<sup>1</sup>, Дмитриченко А. С.<sup>2</sup>, Шаталов И. М.<sup>3</sup>,  
Щербакова М. К.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси»,

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет»,

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

*Предложено использование конечно-разностного метода интегрирования дифференциальных уравнений (метода характеристических уравнений С. А. Христиановича) для неустановившегося постепенно или плавно изменяющегося движения в условиях высокогорья при прорыве плотины. Приводятся результаты предварительных гидравлических исследований волны перемещения, которые подтвердили ранее проведенные теоретические исследования*

Причинами разрушения грунтовых плотин являются: сейсмические воздействия на сооружения; подпорный уровень воды, превышающий расчетную величину; аварийное состояние сооружения 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.

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 теоретические и лабораторные исследования в гидродинамическом лотке.

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 (рис. 1).



Рис. 1. Плотина Тахтакорпюнского водохранилища

Теоретическое решение задачи об определении основных параметров волны перемещения, как правило, заключается в интегрировании системы двух уравнений: уравнения баланса расхода (т. е. уравнения неразрывности плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле) и уравнения динамического равновесия (т. е. дифференциального уравнения плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле).

Эту систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \\ (i - A Q^2) g = \frac{g}{B} \frac{\partial \omega}{\partial l} + \alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \alpha v \frac{\partial v}{\partial l}. \end{cases} \quad (1)$$

где  $Q$  – объемный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  $v$  – средняя скорость, м/с;  $l$  – длина рассматриваемого участка, м;  $t$  – момент времени, с;  $i$  – уклон свободной поверхности воды;  $A$  – удельное сопротивление русла, с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $AQ^2$  – уклон трения  $i_{тр}$ ;  $B$  – ширина русла по поверхности потока, м;  $\alpha_0$  – коэффициент Буссинеска;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса.

Для решения системы уравнений (1) в практических задачах при определении основных параметров неустановившегося плавно изменяющегося движения воды в условиях высокогорья в виде волны перемещения прямой или обратной, положительной или отрицательной наиболее применим метод конечных приращений.

В результате решения системы уравнений (1) в конечных разностях уравнение динамического равновесия примет вид:

$$i_0 = \frac{\bar{v}^2}{\bar{C}^2 \bar{R}} - \frac{h_1 + h_2 - h_3 - h_4}{2\Delta l} - \alpha_0 \frac{v_1 - v_2 + v_3 - v_4}{2g\Delta t} - \alpha \bar{v} \frac{v_1 + v_2 - v_3 - v_4}{2g\Delta l}, \quad (2)$$

при  $\alpha = \alpha_0 = 1$

$$i_0 = \frac{\bar{v}^2}{\bar{C}^2 \bar{R}} - \frac{h_1 + h_2 - h_3 - h_4}{2\Delta l} - \frac{v_1 - v_2 + v_3 - v_4}{2g\Delta t} - \bar{v} \frac{v_1 + v_2 - v_3 - v_4}{2g\Delta l}. \quad (3)$$

В свою очередь уравнение баланса расхода (или уравнение неразрывности) потока жидкости в открытом русле системы (1) в конечных приращениях принимает вид

$$-\frac{\omega_1 v_1 + \omega_2 v_2 - \omega_3 v_3 - \omega_4 v_4}{2\Delta l} - \frac{\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4}{2\Delta t} = 0. \quad (4)$$

Уравнения (2), (3) и (4) позволяют найти параметры  $h$  и  $v$  неустановившегося потока в любой отрезок времени  $\Delta t$  и в любых сечениях этого потока, а также построить кривую свободной поверхности волны перемещения (прямой и обратной) в условиях высокогорья при прорыве плотины.

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.

Эксперименты проводили в лаборатории Белорусского национального технического университета в прямом точном гидравлическом лотке шириной 332

0,245 м с прозрачными стенками (рис. 2). Поток снимали неподвижной камерой.

Для определения основных параметров потока, движущегося в нижнем бьефе сооружения, была разработана методика проведения лабораторных исследований.

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.

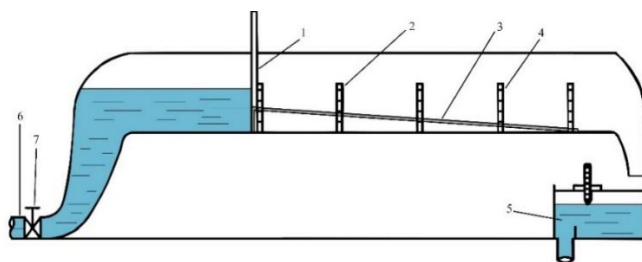


Рис. 2. Схема экспериментального лабораторного стенда:

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

Всего было проведено 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 (рис. 3).

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 (рис. 3, а–д). Затем вода стекает по крутому склону лотка, находясь в бурном состоянии, со значительным уменьшением глубины  $h$  и увеличением средней скорости  $v$  потока (рис. 4). Это свидетельствует о появлении прямой отрицательной волны перемещения. Здесь следует отметить, что при мгновенном открытии подвижного затвора 1 (что соответствует полному разрушению земляной плотины) появлялась прямая

положительная волна перемещения с резким уменьшением глубины в начальном сечении и мгновенным растеканием бурного потока (рис. 3, *e*).

При движении по наклонной поверхности (горному склону) поток всегда находится в бурном состоянии, а волна перемещения обладает максимальной скоростью и огромной разрушительной способностью (рис. 4). Далее, достигнув горизонтальной плоскости в гидродинамическом лотке, поток переходит в спокойное состояние; при этом появляется обратная положительная волна (рис. 6), у которой глубина увеличивается, что в натуральных условиях приведет к затоплению окружающей территории и дополнительным локальным разрушениям в водоворотной зоне (рис. 5).

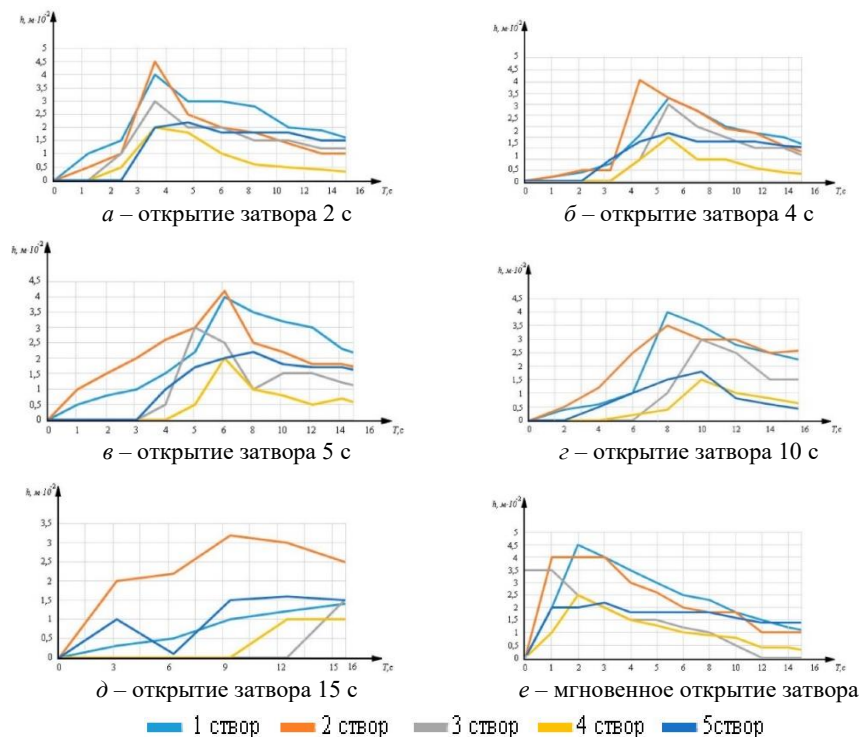


Рис. 3. График изменения глубины потока воды  $h$  (высоты волны перемещения) в зависимости от времени перемещения потока  $T$  в нижнем бьефе модели при различном времени открытия затвора

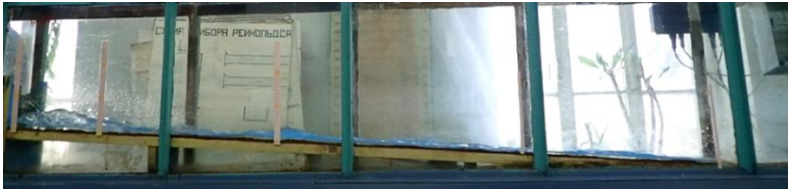


Рис. 4. Общий вид волны перемещения при мгновенном открытии затвора

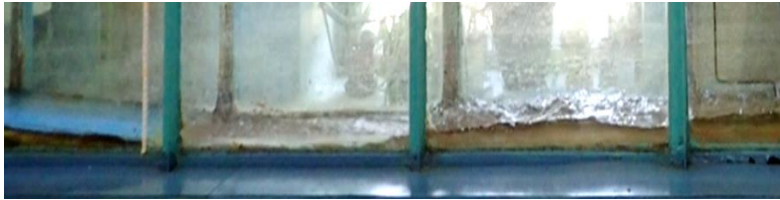


Рис. 5. Общий вид обратной волны

Экспериментальная модель движения волны перемещения визуально подтвердила рассмотренные ранее теоретические исследования [1] 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.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования и полученные результаты позволяют оценить изменения основных гидравлических параметров (скорость и глубина) волны перемещения в зависимости от времени развития прорана. Полученные данные будут использованы для оценки и расчета возможных зон разрушения и затопления прилегающей к водохранилищу территории.

### Литература

1. 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.