

## СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ ЗА ТРУБЧАТЫМИ ВОДОСБРОСАМИ И ВОДОСПУСКАМИ

**Г. Г. Круглов**, кандидат технических наук  
**О. В. Немеровец**, преподаватель-стажер  
**Д. В. Казьмирук**, студент

Белорусский национальный технический университет,  
 г. Минск, Беларусь

### Аннотация

Башенные водосбросы нашли широкое применение в составе низко- и средненапорных речных гидроузлов. Их гидравлический расчет заключается в определении их пропускной способности и сопряжении бьефов. Как показали расчеты сопряжения бьефов за башенными водосбросами, а также данные лабораторных исследований, существующие рекомендации по определению сжатой глубины дают значительные погрешности в нахождении длины водобоя за водосбросом. Анализ результатов лабораторных исследований позволил выявить функциональную зависимость сжатой глубины от диаметра трубы и глубин воды в верхнем и нижнем бьефах и получить эмпирическую зависимость, пользуясь которой, в рамках оговоренных граничных условий, можно определять величину сжатой глубины и получать достоверные параметры крепления в нижнем бьефе башенного водосброса.

**Ключевые слова:** башенный водосброс, напорная труба, сопряжение бьефов, сжатая глубина, водобой.

### Abstract

**G. G. Kruglov, O. V. Nemerovets,  
 D. V. Kazmiruk**

### CONJUGATION WATER STEPS IN PIPE SPILLWAYS AND WATERWAYS

Tower spillways are widely used in the low-pressure and medium-pressure waterworks. Their hydraulic calculation is to determine their capacity and conjugation water steps. Conjugation water steps calculations for tower spillways as well as research data showed that existing recommendations for determination of compressed depth gave significant errors in finding the length of the apron on spillway. Analysis of laboratory test results have identified functional dependence of compressed depth on the pipe diameter and the headwater and tailwater depth, and get an empirical relationship. Usage of it within the specified boundary condition can determine the quantity of compressed depth and obtain reliable fixing parameters in the tailwater at the tower spillway.

**Keywords:** tower spillway, standpipe, conjugation water steps, compressed depth, apron.

### Введение

Трубчатые водопропускные сооружения в составе речных напорных гидроузлов могут выполнять следующие функции:

- пропуск паводковых расходов в нижний бьеф;
- подача воды к водопотребителям и водопользователям;
- пропуск санитарных расходов в нижний бьеф;
- опорожнение водохранилища в случае аварийной ситуации;
- удаление наносов, отложившихся в верхнем бьефе.

Устройство бетонных, железобетонных или металлических труб в теле земляной плотины всегда связано с опасностью возникновения контактной фильтрации и фильтрационных деформаций грунта тела плотины. Однако они нашли широкое применение в составе низко- и средненапорных гидроузлов в связи с тем, что существенно упрощают пропуск расходов воды в реке в период строительства ги-

дрозла и не требуют устройства дополнительных временных сооружений для этих целей.

В зависимости от конструкции входной части трубчатые водопропускные сооружения бывают башенными, безбашенными и ковшовыми. Наибольшее распространение во многих странах ближнего и дальнего зарубежья получили башенные водосбросы (рис. 1).

Так эти сооружения представлены на большинстве водохранилищ Туниса (Сиди-Салем, Сиди-Саад, Джумин и Сиди эль-Баррак и др. на реках Меджерда и Мелег), на гидроузлах Украины (Карловский гидроузел на р. Волчья, гидроузел на р. Завадовка, Маячковский гидроузел на р. Сухая Ольховатая и др.), на белорусских водохранилищах («Стародворское» на р. Бездонница Витебской области (рис. 2), «Меркуловичи» на р. Чечера Гомельской области (рис. 3), «Зельва» на р. Зельвянка Гродненской области (рис. 4) и др.)

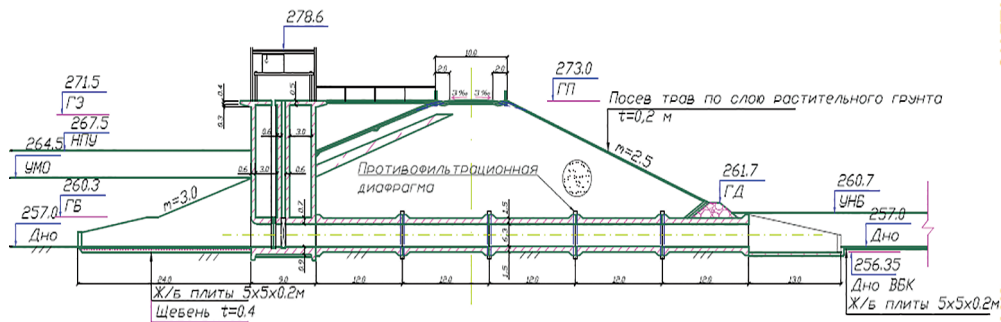


Рис. 1 – Продольный разрез по башенному водосбросу



Рис. 2 – Башенный водосброс водохранилища «Стародворское»



Рис. 3 – Башенный водосброс водохранилища «Меркуловичи»



Рис. 4 – Башенный водосброс водохранилища «Зельва»

Гидравлические расчеты трубчатых сооружений могут выполняться по двум схемам: для длинных трубопроводов и коротких труб [1, 2]. Короткими считаются трубы, у которых длина не оказывает влияния на пропускную способность. Как правило, башенные водосбросы относятся к коротким трубам.

Гидравлический режим в трубе может быть безнапорным, полупапорным и напорным. Гидравлический расчет состоит в определении размеров и количества отводящих труб, необходимых для

пропуска расчетных расходов, а также в расчете сопряжения бьефов за водосбросом.

Расчет заключается в определении сжатой глубины  $h_c$  за водосбросом, которая принимается за первую сопряженную глубину  $h'_c = h_c$ , нахождении второй сопряженной глубины  $h''$  и определении конструкции и параметров крепления нижнего бьефа.

Основной проблемой в расчетах сопряжения бьефов за башенными водосбросами является определение сжатой глубины. При напорном режиме



в трубе предлагается за сжатую глубину принимать глубину на выходе из трубы. Ее рекомендуется принимать или равной высоте трубы [3, 4, 5], или  $0,85 h_k$  [6, 7], где  $h_k$  – критическая глубина, которая незначительно отличается от высоты трубы.

Выполненные по этим рекомендациям многочисленные расчеты сопряжения бьефов показали, что при напорах 8–20 м и диаметрах труб 1,5–3,0 м длина водобоя не превышала 3–6 м.

Очевидно, что для мощной, концентрированной струи, выходящей из напорной трубы, такой длины водобоя недостаточно для гашения избыточной кинетической энергии потока. Действительно, длина водобоя за башенными водосбросами на действующих украинских гидроузлах (Карловском, Завадовском, Краснопавловском, Анновском и др.) колеблется в интервале 17–20 м, что подтверждает ошибочность предлагаемой методики расчета.

Таким образом, основной задачей исследования было изучение режимов сопряжения бьефов и нахождение экспериментальной зависимости для определения сжатой глубины, использование которой при расчетах сопряжения бьефов давало бы результаты, согласующиеся с реальными параметрами действующих сооружений.

#### Лабораторные исследования

С этой целью в лаборатории кафедры гидротехнического и энергетического строительства Белорусского национального технического университета были выполнены исследования режимов сопряжения бьефов за тремя трубами диаметром 3,5 см, 4,5 и 6,5 см.

В основу гидравлических исследований потока в нижнем бьефе башенного водосброса положен метод физического моделирования. Для правильного воспроизведения физической природы явлений необходимо обеспечить механическое, кинематическое и динамическое подобие изучаемых явлений, которые выражаются в геометрическом подобии форм, распределении скоростей, давлении и других физических констант [8, 9].

При моделировании безнапорных турбулентных потоков, которые характеризуются наличием свободной поверхности, где движение происходит с преобладанием сил тяжести, определяющим является равенство критериев Фруда. При этом режимы движения потока на модели и в натуре должны быть подобны, что проверяется выполнением условия:

$$R_e > R_{екр} \quad (1)$$

Критическое значение числа Рейнольдса для открытых русел составляет:  $R_{екр} = 800 \dots 900$ . Кроме того, для модели и натуре должны быть равны значения коэффициентов гидравлического трения.

Для исследованного на модели диапазона глубин в нижнем бьефе 2,1...9,05 см числа Рейнольдса изменялись в пределах 2500...3500, что соответствовало условию (1).

Для соблюдения подобия коэффициентов гидравлического трения коэффициент шероховатости материала модели должен быть в  $\lambda$  ( $\lambda$  – масштаб моделирования) раз меньше коэффициента шероховатости натуре.

Дно нижнего бьефа башенного водосброса крепится бетонными и железобетонными плитами, для которых коэффициент шероховатости принимается равным 0,014...0,017. Для геометрического подобия модели в  $\lambda$  раз меньше натуре коэффициент шероховатости модели также должен быть в  $\lambda$  раз меньше коэффициента шероховатости натуре. При масштабе моделирования  $\lambda = 60 \dots 70$  коэффициент шероховатости модели будет составлять 0,007...0,008. Согласно [8, 9] такие поверхности могут быть изготовлены из тщательно отструганных досок, покрытых эмалевой краской.

Трубы устанавливались в гидравлическом зеркальном лотке шириной 16 см и длиной 250 см (рис. 5), с деревянным, окрашенным дном.

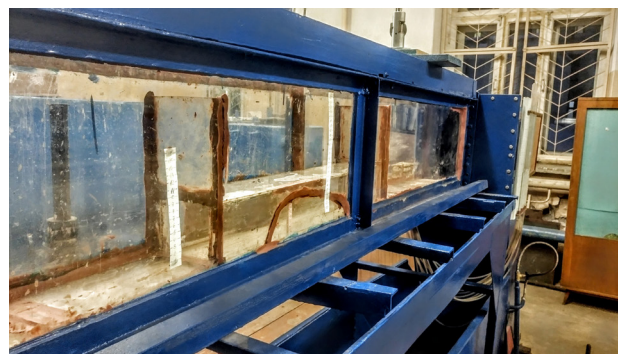


Рис. 5 – Общий вид опытной установки

Для измерения отметок уровней воды в верхнем и нижнем бьефах использовалась передвижная мерная игла, установленная на бортах лотка. Точность измерения отметок уровней воды с помощью мерной иглы составляла 0,1 мм.

Регулирование расхода воды, поступающего на модель, осуществлялась с помощью задвижки на подающем трубопроводе, а регулирование уровней воды в нижнем бьефе – с помощью жалюзи на выходе из лотка.

Исследования выполнялись в следующем порядке. В верхнем бьефе перед трубой устанавливалась максимальная глубина. Труба работала в напорном режиме. В нижнем бьефе с помощью жалюзи устанавливался режим отогнанного гидравлического прыжка (рис. 6). При установившемся режиме истечения измерялись глубина в верхнем бьефе  $H_1$ , в нижнем бьефе за прыжком  $H_2$ , соответствующая бытовой

глубине  $h_6$ , и глубина воды в сжатом сечении  $h_c$ . После этого изменялись глубины в верхнем и нижнем бьефах, и повторялись все измерения.

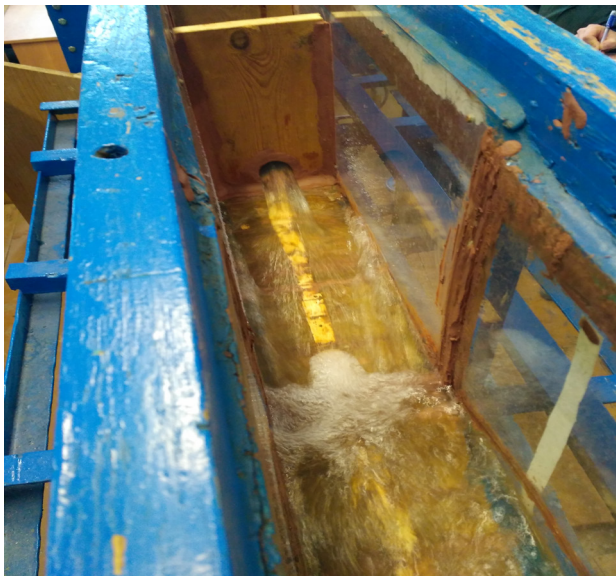


Рис. 6 – Режим отогнанного прыжка за трубчатым водосбросом

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Опытные значения сжатой глубины

$D$ , см	$H_1$ , см	$H_2$ , см	$h_c$ , см
6,5	27,55	8,20	1,60
	17,90	8,00	4,50
	20,05	8,65	3,45
	20,00	9,05	4,50
	23,65	2,10	1,00
	23,65	8,70	2,60
	19,10	7,35	2,60
	11,20	6,20	3,20
4,5	23,45	6,10	0,90
	25,90	6,60	0,85
	21,85	8,30	1,60
	13,05	5,30	2,40
	17,95	6,70	2,20
3,5	21,80	4,00	0,70
	16,10	2,70	0,60
	14,65	3,80	0,86
	22,45	6,20	1,20
	16,6	6,10	1,90

Как видно, во всех опытах сжатая глубина значительно меньше диаметра трубы, следовательно, использование вышеприведенных рекомендаций по определению сжатой глубины приводит

к значительным погрешностям в определении длины водобоя, что и показали выполненные многочисленные расчеты сопряжения бьефов за башенными водосбросами.

Проведенный анализ опытных данных показал, что сжатая глубина является функцией трех переменных:

$$h_c = f(H_1, H_2, D). \quad (2)$$

При выводе эмпирического уравнения регрессии, описывающего зависимость (2), использовались не абсолютные величины переменных, а относительные, что значительно упростило применение полученного уравнения. В связи с этим были введены относительные величины  $\frac{H_1}{D}$  и  $\frac{h_c}{H_2}$ , характеризующие связи между сжатой глубиной, диаметром дрены и глубинами воды в верхнем и нижнем бьефах.

В результате обработки опытных данных был получен график (рис. 7), устанавливающий связь между включенными в зависимость (2) переменными.

Расчеты, связанные с определением коэффициентов эмпирического уравнения регрессии методом наименьших квадратов [10, 11], дисперсионным анализом по проверке гипотезы линейности эмпирического уравнения, позволили получить зависимость:

$$\frac{h_c}{H_2} = 0,679 - 0,088 \frac{H_1}{D}, \quad (3)$$

теснота связи переменных в которой характеризуется коэффициентом корреляции  $r = 0,824$ .

Пользуясь зависимостью (3), при граничных условиях

$$\frac{H_1}{D} = 1,7 \dots 6,5 \text{ и } \frac{H_2}{D} = 0,7 \dots 1,8$$

и области применения  $0,12 < \frac{h_c}{H_2} < 0,56$  можно

определять сжатую глубину за башенным водосбросом, работающем в напорном режиме.

Выполненные расчеты сопряжения бьефов с использованием зависимости (3) дают длину водобоя в интервале 10–16 м, что согласуется с параметрами действующих башенных водосбросов.

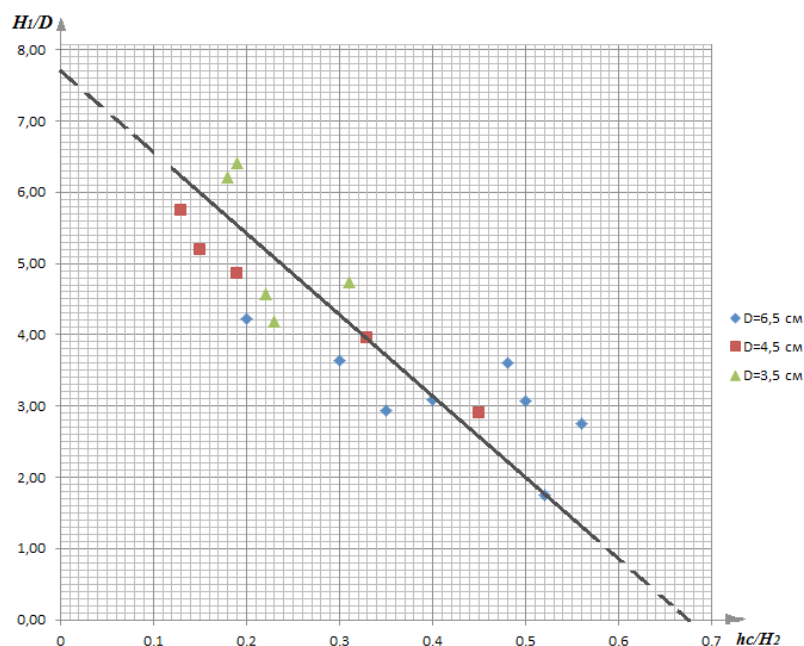


Рис. 7 – Графики зависимости  $\frac{h_c}{H_2} = f\left(\frac{H_1}{D}\right)$

### Выводы

1. Показана существенная погрешность существующей методики определения сжатой глубины при расчете сопряжения бьефов за бешенными водобросами, работающими в напорном режиме.

2. Опытным путем получена зависимость для определения сжатой глубины. Ее использование для расчета сопряжения бьефов дает результаты в определении длины водобоя, хорошо согласующиеся с параметрами действующих сооружений.

### Библиографический список

1. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений : справочное пособие / Д. Д. Лаппо [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.
2. Богославчик, П. М. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 367 с.
3. Волков, И. М. Проектирование гидротехнических сооружений / И. М. Волков, П. Ф. Кононенко, И. К. Федичкин. – М. : Колос, 1968. – 464 с.
4. Недрига, В. П. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / В. П. Недрига. – М. : Стройиздат, 1983. – 543 с.
5. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов : учеб. пособие / П. М. Богославчик [и др.]; под ред. Г. Г. Круглова. – Минск : БНТУ, 2006. – 585 с.
6. Нестеров, Н. В. Гидротехнические сооружения : учеб. пособие / Н. В. Нестеров. – Минск : Новое знание, 2006. – 616 с.
7. Примеры гидравлических расчетов : учеб. пособие для вузов / Н. М. Константинов [и др.]; под ред. Н. М. Константинова. – М. : Транспорт, 1987. – 440 с.
8. Леви, И. И. Моделирование гидравлических исследований / И. И. Леви. – Ленинград : Энергия, 1967. – 210 с.
9. Шарп, Дж. Гидравлическое моделирование : пер. с англ. / Дж. Шарп. – М. : Мир, 1984. – 280 с.
10. Айвазян, С. А. Статистическое исследование зависимостей / С. А. Айвазян. – М. : Metallургия, 1968. – 227 с.