

## ТЕЧЕНИЯ ПРЕРЫВНОГО ВОЛНОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ОГРАДИТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

© 2014

**С.Ш. Сайриддинов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления»  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения; прерывная волна; волновой поток; боковое сужение русла; вертикальное сужение русла; водослив; оградительные сооружения.

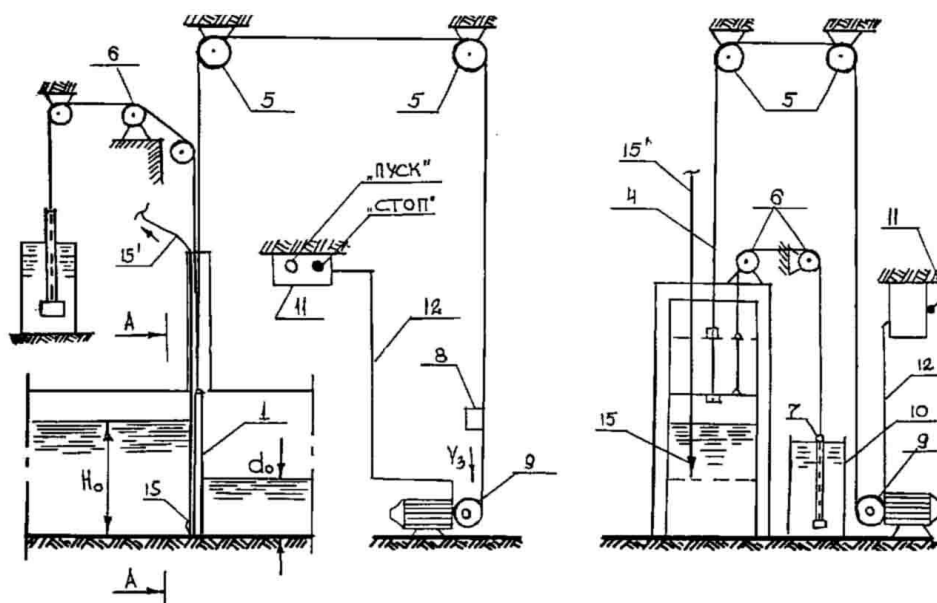
**Аннотация:** В статье представлены результаты экспериментальных исследований, позволяющие давать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров прерывных волн при взаимодействии с оградительными сооружениями различной конфигурации и совершенствовать методику расчета и проектирования объектов гидротехники, водоснабжения и водоотведения.

Данная работа была выполнена экспериментально в лаборатории газогидравлической аналогии кафедры гидравлики МИСИ–МГСУ на гидравлическом лотке, имеющем длину 90 м. В данной статье рассматривается физическое моделирование процесса течения прерывной волны через преграды различной конфигурации наиболее типичных для инженерной практики [1]. Рассматривались как вертикальные, так и горизонтальные сужения волнового потока. Волновой поток испытывал сжатие по вертикали при изменении отметки дна канала. В процессе эксперимента был использован гидродинамический волнопродуктор [1, 2, 3], с помощью которой были получены прерывные волны путем быстрого открытия затвора (рис. 1). Скорость подъема затвора в диапазонах 0,5÷8,0 м/с не оказывали заметного влияния

на форму генерируемой волны. В наших опытах скорости подъема затвора изменились в пределах от 1 до 2,5 м/с.

В процессе работы с гидрозатвором были использованы две разработанные нами физические схемы, которые позволяли регистрировать время подъема затвора до выхода из потока воды и сам процесс его движения (рис. 1). Первая схема состояла из датчика уровня 15 прикрепленного к нижней части щита затвора 1; вторая – из чувствительного элемента уровнемера 7, который через систему блоков 6 был связан тросом с затвором волнопродуктора 1, и его заглубление в сосуд с водой 10 соответствовало подъему затвора. Отношение длин верхнего бьефа и нижней части лотка составляло:

$$\frac{L_0}{L_n} \geq 1,2 \div 1,7 \quad (1)$$



**Рис. 1.** Схема электрического гидрозатвора

- 1 – затвор из алюминия; 2 – подвижная стенка верхнего бака волнопродуктора; 3 – модель местного сужения; 4 – стальной трос; 5, 6 – блоки; 7 – чувствительный элемент уровнемера; 8 – зажим на конце троса; 9 – электропривод постоянного тока для изменения скорости подъема затвора; 10 – емкость с водой; 11 – пульт управления; 12 – линии электропередач; 13 – пластины, регулирующие уровень воды в нижней части лотка; 14 – отверстие для установки требуемого уровня в верхнем баке волнопродуктора; 15 – датчик уровня; 15\* – провод, подающий в осциллограф сигнал момента отсоединения затвора от потока воды

Интенсивность прерывной волны (рис. 2) в опытах изменялась в следующем интервале:

$$1,5 \leq \frac{h_1}{d_0} \leq 4,5; \quad h_1 = h_0 + d_0 \quad (2)$$

где  $h_1$  – глубина исходной волны;  
 $d_0$  – глубина воды в лотке;  
 $h_0$  – высота исходной волны.

Условие (1) позволяло получать на установке прерывные волны, длина которых превышала протяженность нижней части лотка (рис. 2) в опытах значение числа Фруда

$$Fr = \frac{C_1}{\sqrt{gd_0}}$$

$$1,25 \leq \frac{C_1}{\sqrt{gd_0}} \leq 3,5 \quad (3)$$

Экспериментальная модель оградительных сооружений различной конфигурации в боковом разрезе (рис. 3) и в плане (рис. 4) позволяли провести исследования прохождения прерывных волн через различные виды местных преград, которые имеют место в реальных условиях при строительстве каналов и морских портов [1, 4, 5, 6].

Модель экспериментальной установки (уступ) общей длиной 4,1 м монтировалась в нижней части лотка на удалении 13 м от гидрозатвора и представляла его второе дно.

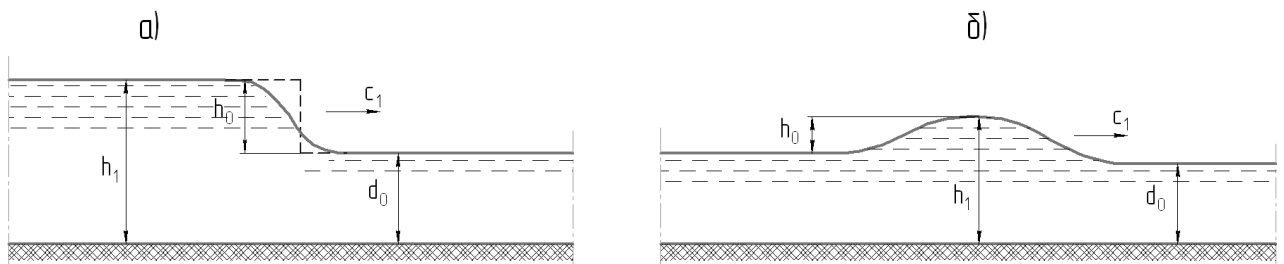


Рис. 2. Виды исследуемых волн. а) прерывная ; б) уединенная (гладкая)

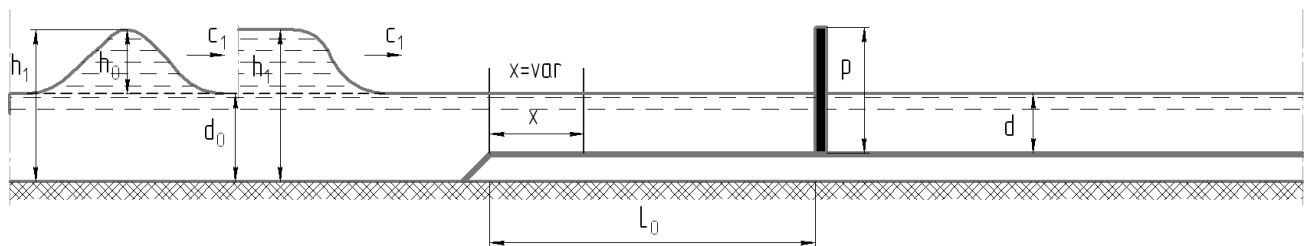


Рис. 3. Схема вертикального расположения оградительных сооружений

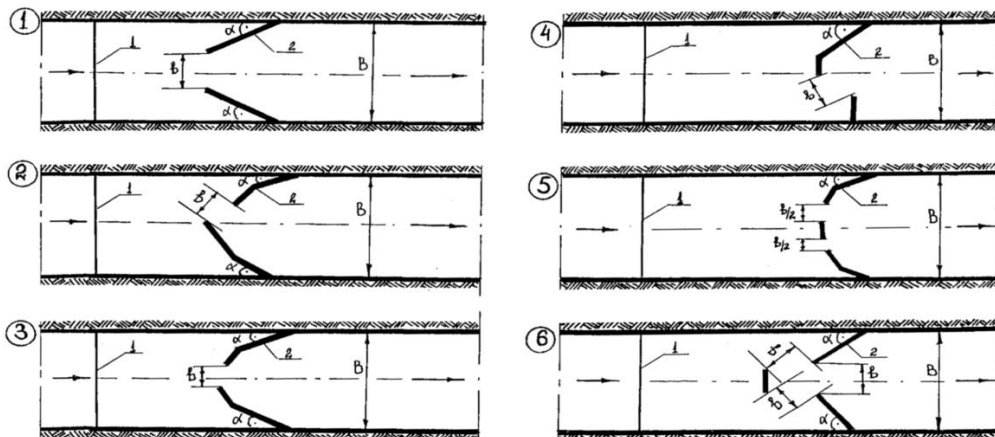


Рис. 4. Типы исследуемых моделей оградительных сооружений  
 1 – уступ; 2 – оградительное сооружение

На это фальшь дно укладывались 10 стальных плит размером  $a=400 \times b=400 \times m=8$  мм и дополнительно 2 плиты:  $a=400 \times b=200 \times m=8$  мм и  $a=400 \times b=100 \times m=8$  мм. На 4-х рабочих плитах были выполнены пазы шириной 2 мм глубиной 6 мм. В плане схема фрезерных канавок на рабочих плитах соответствовала всем схемам местных сужений (рис. 4), на которых предстояло провести исследования процессов трансформации волны. В канавах этих рабочих плит устанавливались стальные пластины, высота которых в первом случае позволяла падающей волне переливаться через гребень

$$0,5 \leq \frac{P-d}{h_0} \leq 1,7,$$

где  $P$  – высота пластины.

Во втором случае происходило отражение падающей волны. Здесь данное соотношение изменилось в интервале

$$1,7 \leq \frac{P-d}{h_0} \leq 6,0,$$

кроме того, расстояние между концами пазов в рабочих плитах во всех опытах сохранялось постоянным и численно равнялось

$$b/B=0,27. \quad (4)$$

Длины пластин для каждой рассматриваемой модели местных сужений подбирались индивидуально, с учетом условия (4) и плотного прилегания к стенкам лотка. Разработанная конструкция установки позволяет проводить исследования трансформации через местные сужения, как необрушенных, так и обрушенных волн. Перестановки рабочих и транзитных плит между собой обеспечивают возможность располагать модели вблизи уступа на удалении  $L_0=0,2$  м. Перед уступом установки устанавливался откос (рис. 3) с углом  $\alpha=30^\circ$ . Данное значение сохранялось и в сериях опытов при масштабном увеличении.

В процессе генерации моделируемых волн, их последующей трансформации в области постоянных глубин и при прохождении через оградительные сооружения требовалось получить достоверные характеристики волновых процессов и зафиксировать их с помощью соответствующей аппаратуры. Регистрировались следующие параметры моделируемой волны: высота  $h_0$ , длина  $\lambda_0$ , скорость распространения фронта прямой, отраженной и прошедшей волны  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_{np}$ . Измерения данных параметров производились дискретно, в местах, представляющих наибольший интерес, где происходили качественные изменения волнового возмущения (при генерации длинных волн), а именно: перед местными сужениями, за ними и непосредственно в акватории их расположения (рис. 5, позиция б). При подходе и прохождении волны через местные сужения, а также за ними требовалось достаточно точно измерить высоту заплеска  $h_3$ , высоту отраженной волны  $h_2-d_0$  и высоту прошедшей волны  $h_{np}$ , значения скорости потока в этих створах при прохождении волны  $C_1$  и отражения  $C_2$ . Кроме того, необходимо было зафиксировать

время, за которое произойдет подъем воды на створе сооружения, а также возврат уровня воды в исходное положение.

Для регистрации волновых процессов были использованы серийно выпускаемые промышленностью датчики уровня типа РУС-ПСФ с классом точности 1,0; 1,5 (где РУС – тип уровнемера; ПСФ – исполнение первичного преобразователя в виде провода во второпластовой изоляции). Характеристики у них изменялись в следующем: выход по току от 0 до 20 мА; диапазон измерения в метрах от 0,6 до 4,0.

Расстановка измерительной аппаратуры, а именно датчиков уровня, производилась в местах, имеющих наиболее научно-практический интерес (рис. 5). Место расположения первого датчика уровня от волнопродуктора определялось из расчета того, чтобы форма волны приняла симметричный профиль, близкий к расчетному, до прихода к ней. Последующая расстановка датчиков уровня позволила определить скорости движения фронта волны  $C$  и ее глубину  $h$  в определенных створах местного сужения, а также за ним. На удалении  $L=0,2$  м и 0,9 м менялись формы местных сужений. До места изменения отметки дна лотка (уступа) устанавливались два датчика уровня для регистрации параметров подходящих волн. А за уступом, где располагались местные сужения, устанавливались 6 уровнемеров, которые регистрировали изменение параметров волн в момент взаимодействия с местными сужениями, а также после прохождения через них.

Кронштейн, длиной  $L=4$  м, установленный по длине лотка на высоту, равную высоте боковых стенок лотка, обеспечивал возможность последовательно перемещать уровнемеры по длине уступа.

Достоверности измерения параметров волны оценивались по известным теоретическим и экспериментальным результатам по распаду произвольного разрыва в диапазоне изменения ее интенсивности. На рис. 6 представлена зависимость скорости фронта волны от ее интенсивности. Совпадение результатов наших измерений с теоретической кривой, полученной по формуле:

$$C_1 / \sqrt{gh_1} = \sqrt{\frac{h_1 + d_0}{2d_0}}, \quad (5)$$

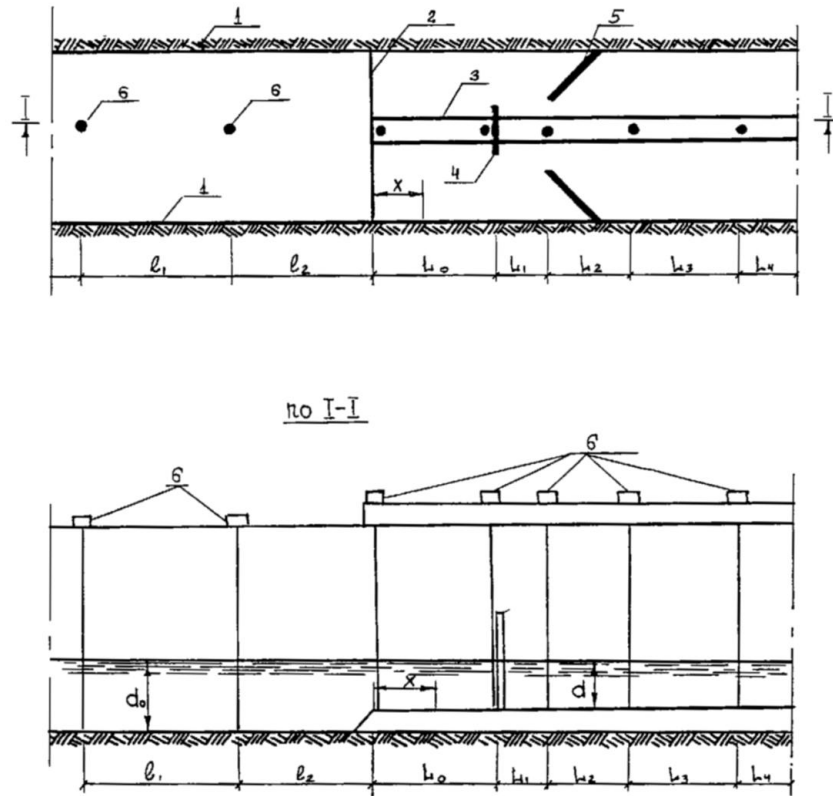
и результатами измерения других авторов свидетельствуют о достоверности измеренных нами параметров исходной прерывной волны [7, 8].

В опытах высота местных преград выбиралась исходя из условий отражения и перелива волны через стенку [1, 4, 6]. Основным аргументом выбиралось возвышение стенки над ординарным уровнем воды, т.е.  $p-d$ , значение которых в реальных условиях со-

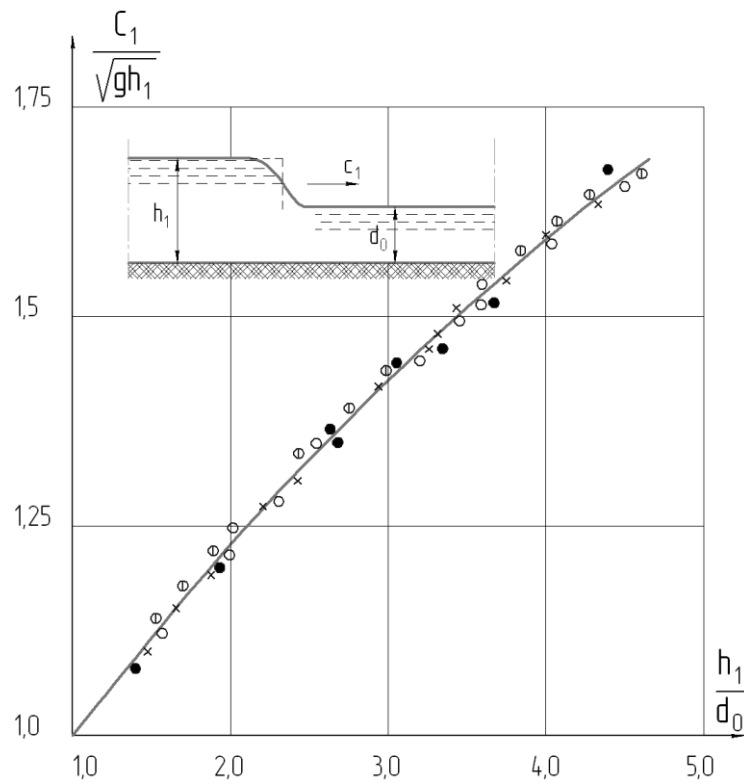
ставляют  $\frac{h}{p-d} = 1 \div 7$ . Это условие и было выполнено на наших моделях.

В качестве конечных результатов рассматривался коэффициент ослабления волн на различных схемах местных сужений

$$K_{oc} = \frac{h_{np} - d}{h_1 - d_0},$$



**Рис. 5.** Схема расположения датчиков уровня на модели оградительных сооружений  
 1 – боковые стенки лотка; 2 – уступ; 3 – кронштейн для перемещения датчиков уровня; 4 – волнолом;  
 5 – сходящиеся молы; 6 – датчики уровня типа РЭС.



**Рис. 6.** Зависимость скорости фронта подходящей волны от ее интенсивности  
 ● –  $d_0=(5,0\pm 5,6)$  см; ○ –  $d_0=(7,2\pm 7,5)$  см – автор; ⊙ – по работе [8]; x – по работе [7]; — – по формуле (5)

где  $h_{np}$  – глубина прошедшей волны;  
 $K_{oc}$  – коэффициент ослабления волны.

В проводимых опытах параметры прерывной волны (гидравлического бора) и значение числа Фруда в теле волны изменялись по условиям (2) и (3), а высота сооружения изменялась в следующих интервалах:

$$0,3 \leq h_0 / (p - d) \leq 2.$$

Процесс трансформации волны на уступе (рис. 7) сопровождался изменением высоты исходной волны в створе местного сужения, что приводило к отражению волны от уступа  $c_{1\text{отп}}$  (первая отраженная) и от местного сужения  $c_{2\text{отп}}$  (вторая отраженная). Первая отраженная волна имела наибольшее возвышение в головной части, и на ее поверхности возникали вторичные колебания (рис. 8). Вторая отраженная волна имела наибольшее возвышение и имела более пологий фронт. Образование цуга волн за фронтом отраженных волн зависело от интенсивности исходной волны  $h_0/d_0$ . Высота волны за местным сужением  $h_{np}-d$  имела минимальные значения по сравнению с высотой волны в предыдущих створах, т.е.

$$(h_{np} - d) < (h_{cm} - d)$$

$$(h_{np} - d) < (h_{ycmyn} - d).$$

На рис. 8 приведена осциллограмма записи волнового процесса при следующих исходных параметрах

$$h_0/d_0 = 0,7;$$

$$h_0/(p-d) = 0,75;$$

$$d/d_0 = 0,4.$$

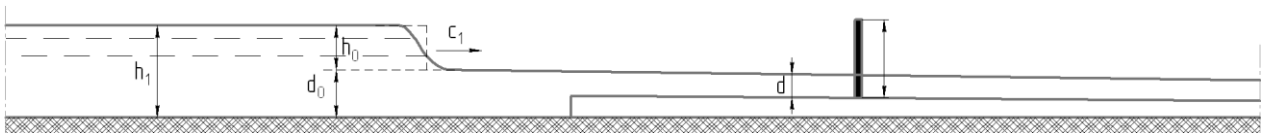


Рис. 7. Схема процесса подхода исходной прерывной волны на участок с уступом и местным сужением

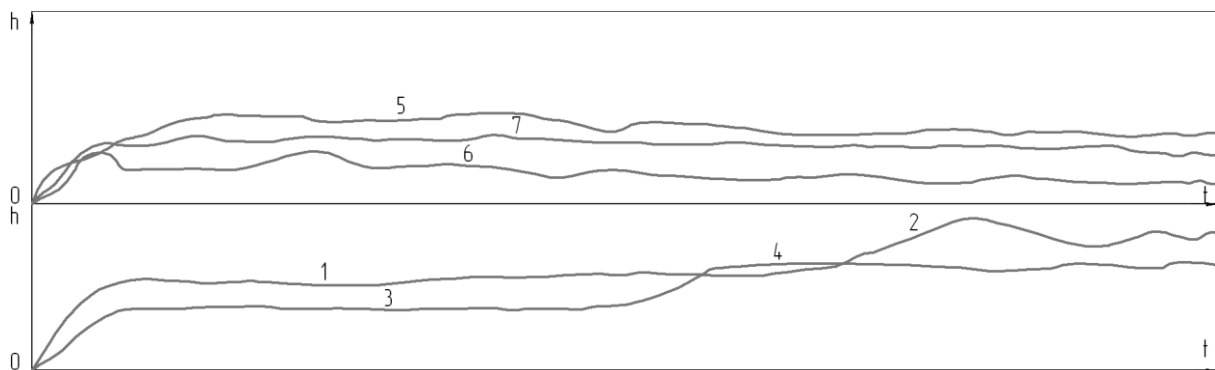


Рис. 8. Осциллограмма записи процесса трансформации прерывной волны на уступе  
 1 – исходная волна; 2 – первая отраженная волна; 3 – волна на уступе; 4 – вторая отраженная волна;  
 5 – волна на створе оградительного сооружения; 6 – волна за оградительным сооружением;  
 7 – прошедшая волна.

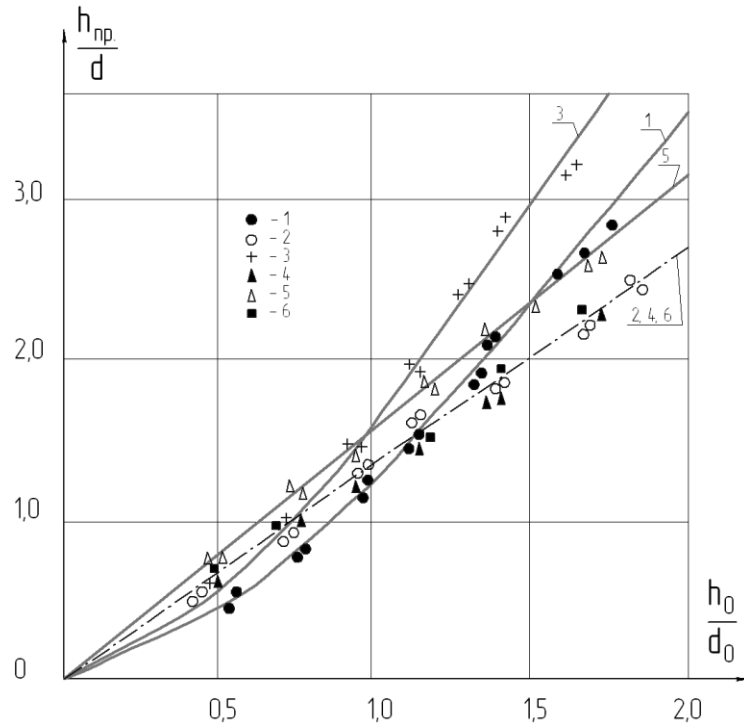
Эксперимент показал, что при  $h_0/(p-d) > 1$  происходит уменьшение высоты заплеска около стенки. Это можно объяснить тем, что влияние местных сужений на исходные волны становится намного меньше по мере увеличения  $h_0$ .

При выполнении эксперимента по измерению высоты прошедшей волны был выбран створ на удаление  $x/d=34$  от уступа. В этом случае глубина  $d$  поддерживалась постоянной. Местные сужения и замена других компоновочных схем местных сужений производились на удалении  $L_0/d=21$  от уступа. Эксперименты показали, что выбранное расстояние  $x/d=34$ , на которое производилось измерение высоты прошедшей волны, позволило стабилизироваться уровню воды за фронтом волны.

На рис. 9 представлены результаты по определению высоты прошедшей волны для различных компоновочных схем местных сужений в виде зависимости

$$\frac{h_{np} - d}{d} = f\left(\frac{h_1 - d_0}{d_0}\right). \quad (6)$$

Линия аппроксимации экспериментальных точек, представленных на рис. 9 по схемам 2, 4, 5, 6 (рис. 4), говорят о том, что зависимость (6) практически возрастает по линейному закону, а в случае 1, 3 (рис. 4) линейный закон нарушается. Минимальная высота прошедшей волны наблюдалась в случае схем 6 и 4. В этих случаях высота исходной волны после прохождения уменьшилась на 40–45%. Анализ экспериментальных данных показывает, что в случае изменения компоновки местных сужений по схемам 2, 4, 6 (рис. 4) наблюдается незначительное изменение высоты прошедшей волны. Поэтому экспериментальные точки в случае этих схем аппроксимированы одной кривой.



**Рис. 9.** Зависимость относительной высоты прошедшей прерывной волны от интенсивности подходящей волны для различных компоновочных схем местных сужений  
 ●, ○, +, ▲, Δ, ■ – экспериментальные точки соответственно номерам компоновки местных сужений;  
 — — линии аппроксимации экспериментальных точек;  
 --- обобщающая аппроксимируемая линия в случае компоновки 2,4,6.

**Таблица 1.** Значения коэффициентов для эмпирических формул

№ п/п	Номера рисунков	Вид эмпирической зависимости	Номера схем местного сужения	A	n	Тип волны
1	9	$\frac{h_{np} - d}{d} = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n$ (формула 7)	1	1,28	1,49	прерывная
			2	1,32	1,27	
			3	1,58	1,59	
			4	1,28	1,1	
			5	1,5	1,06	
			6	1,4	1,0	
2	10	$\frac{h_{np} - d}{h_1 - d_0} = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n$ (формула 8)	1	0,5	0,47	прерывная
			2	0,56	0,3	
			3	0,67	0,6	
			4	0,5	0,14	
			5	0,6	0,3	
			6	0,58	0,2	

Результаты, представленные на рис. 9 позволяют представить зависимость (6) в виде эмпирической формулы.

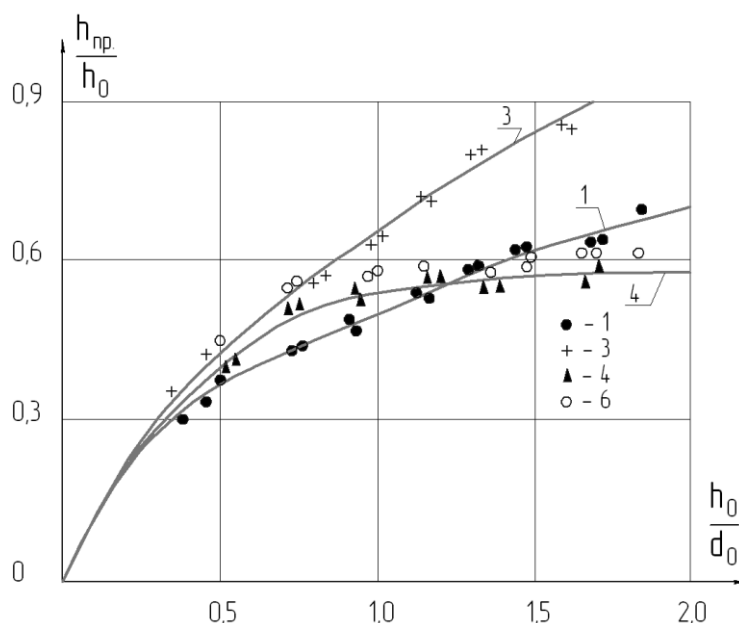
$$\frac{h_{np} - d}{d} = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n, \quad (7)$$

где значения A и n определялись для каждого варианта расположения местных сужений и приводятся в табл. 1 настоящей работы.

Исследования, проведенные по определению коэффициента ослабления  $K_{oc}$  на местных преградах различного расположения, были выполнены при постоянной глубине воды перед уступом  $d_0 = const$  и за уступом  $d = const$ . Соотношение этих глубин в этом случае составляло  $d/d_0=0,4$ .

Результат эксперимента позволил получить графические зависимости в виде

$$K_{oc} = f \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0}, \frac{h_{np} - d}{h_1 - d_0} \right) = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n, \quad (8)$$



**Рис. 10.** Зависимость коэффициента ослабления волны от интенсивности исходной волны для различных компоновочных схем местных сужений (рис. 4). Цифрами обозначены номера схем местных сужений (рис. 4)

где  $K_{oc}$  изменился в зависимости от конфигурации местных преград и определялся на удалении от уступа  $x/d$  и это соотношение сохранялось постоянным во всех случаях и численно равнялось 34.

На рис. 10 приведены результаты (линии аппроксимации экспериментальных точек) по определению коэффициента ослабления волн. Аппроксимация экспериментальных данных производилась по функциональному закону  $y = Ax^n$ , где  $A$  и  $n$  определялись для каждого варианта расположений местных сужений. Значения  $A$  и  $n$  приводятся в табл. 1 настоящей работы. Увеличение высоты исходной волны приводило к уменьшению коэффициента ослабления волн. Изменение компоновочной схемы местных сужений на уступе позволило получить коэффициент ослабления для каждой соответствующей схемы в диапазонах изменения высоты исходной волны. Как видно из рис. 10 коэффициент  $K_{oc}$  имел максимальные значения в случаях расположения оградительных сооружений по форме 4 и 6. Это объясняется влиянием волноломов, входящих в состав этих сооружений на передний фронт исходной волны. Эксперименты показали, что абсолютные значения скоростей фронта прошедшей волны  $C_{пр}$  с ростом высоты исходной волны  $h_0$  увеличиваются, а относительные значения скоростей прошедшей и исходной волны  $C_{пр}/C_0$  колебались от 0,69 до 0,80.

Расположенные местные сужения на уступе позволили уменьшить скорость фронта волны после прохождения на 30 % (в случае схемы 5, 6), а в других случаях на 25–27 %.

Разработана экспериментальная модель позволяющая провести исследования по прохождению различных типов волн через оградительные сооружения различной конфигурации. Полученные экспериментальные результаты позволили получить коэффициенты ослабления прерывной волны (гидравлического бора), проходящие через оградительные сооружения различной конфигурации. Методом математической обработ-

ки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости, устанавливающие связь между параметрами исходной и прошедшей волн через оградительные сооружения различной конфигурации. Экспериментально доказано, что места расположения местных преград существенно влияют на параметры длинных волн. Полученные экспериментальные результаты позволили разработать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров прерывных волн при взаимодействии с оградительными сооружениями различной конфигурации и совершенствовать методику расчета и проектирования объектов гидротехники, водоснабжения и водоотведения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайридинов С.Ш. Прохождение длинных волн через разные формы сжатия в открытых руслах. Дис. к.т.н., М., 1991. С. 150.
2. Сайридинов С.Ш. Исследование течения прерывного волнового потока в открытых руслах с местными боковыми преградами. // В журн. «Вестник СГАСУ» № 2. – Самара, 2014. – С. 63–70.
3. Сайридинов С.Ш. Нестационарные течения в открытых руслах с водосливными преградами // В журн. «Вестник РУДН» № 2 / Серия «Инженерные исследования». – М.: 2011. – С. 62–66.
4. Смирнова Е.Г., Правдивец Ю.П., Смирнов Г.Н. Берегозащитные сооружения. – М., АСВ, 2002. – С. 130–166.
5. Шашлов Ю.А., Сайридинов С.Ш. Трансформация длинных волн через оградительные сооружения различного типа. Сб. тезисы докладов Всесоюзного совещания «Научное обеспечение повышения эффективности использования мелиорируемых земель». М., 1987. С. 245.
6. СНиП 2.06.04-82. Нагрузка и воздействия на гидротехнические сооружения волновые, ледовые и от судов. М., Стройиздат, 1983. 38 с.

7. Саркисян В.А. Особенности отражения длинных волн от преград в открытых потоках. Дисс. к.т.н., М., 1988. С. 146.
8. Сильченко А.С. Накат волн на береговые откосы. Автореферат дисс. к.т.н., М., 1984.

**CONTINUOUS WAVE FLOW THROUGH PROTECTIVE STRUCTURES  
OF VARIOUS CONFIGURATIONS IN OPEN CHANNELS**

© 2014

*S.Sh. Sayriddinov*, candidate of technical sciences,  
associate professor of the chair «Energy machines and controlling systems»  
*Togliatti State University, Tolyatti (Russia)*

*Keywords:* hydrotechnical structures; discontinuous wave; wave flow; vertical riverbed narrowing; spill weir; protective structures.

*Annotation:* The article presents the results of experimental research which allow to give engineering-based recommendations about determination of discontinuous waves characteristics in interaction with protective structures of various configurations and improve methods of calculation and designing of hydraulic and engineering objects, water supply and drainage system.