

УДК 532.1:532.2:626.882.628.14

**С.Ш. САЙРИДДИНОВ****ТЕЧЕНИЯ ГЛАДКОГО (УЕДИНЕННОГО) ВОЛНОВОГО ПОТОКА  
ЧЕРЕЗ ОГРАДИТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ  
В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ***SMOOTH (SECLUDED) WAVE FLOW THROUGH PROTECTIVE STRUCTURES  
OF VARIOUS CONFIGURATIONS IN OPEN CHANNELS*

*Представлены результаты экспериментальных исследований, позволяющие давать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров гладких волн при взаимодействии с оградительными сооружениями различной конфигурации и совершенствовать методику расчета и проектирования объектов гидротехники, водоснабжения и водоотведения.*

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, гладкая (уединенная) волна, волновой поток, вертикальное сужение русла, водослив, оградительные сооружения.

Данная работа была выполнена экспериментально в лаборатории газогидравлической аналогии кафедры гидравлики (МИСИ–МГСУ) на гидравлическом лотке, имеющем длину 90 м [1]. В предложенной статье рассматривается физическое моделирование процесса течения гладкой волны (рис. 2) через преграды различной конфигурации (рис. 4), наиболее типичные для инженерной практики. Рассматривались как вертикальные, так и горизонтальные сужения волнового потока [1-9]. Волновой поток испытывал сжатие по вертикали при изменении отметки дна канала. В нашем случае был смонтирован уступ длиной  $L=4,1$  м на дне канала (рис. 3). По разработанной методике проведения экспериментов [2] в нашем случае соотношения параметров волны ( $\lambda_0/h_0$ ), их интенсивности ( $h_0/d_0$ ), соотношения глубин на уступе ( $d/d_0$ ) и удаления местного сужения от уступа ( $L_0/\lambda_0$ ) соответствовали условиям (2), (3), (7), (8).

В процессе эксперимента использовался гидродинамический волнопродуктор, с помощью которого были получены гладкие волны (рис. 1).

Скорость подъема затвора 1 (рис. 1) в диапазонах 0,5–8,0 м/с не оказывала заметного влияния на форму генерируемой волны. В наших опытах скорости подъема затвора изменились в пределах от 1 до 2,5 м/с. Волнопродуктор был снабжен гидравлическим затвором и призматическим баком, изме-

*This article presents the results of experimental research allowing to give engineering-based recommendations about determination of smooth waves characteristics in interaction with protective structures of various configurations. These results are also be able to improve methods of calculation and designing of objects of hydraulic engineering, water supply and drainage system.*

**Key words:** hydrotechnical structures, smooth (secluded) wave, wave flow, vertical riverbed narrowing, spill weir, protective structures.

нение параметров которого позволило получать волны указанного типа различной высоты ( $h_0$ ) и длины ( $\lambda_0$ ) (рис. 2).

В наших опытах мы генерировали непрерывные волны при следующих параметрах волнопродуктора:

$$\frac{\Delta}{d_0} = 0,7 \div 0,9; \quad \frac{H_0}{d_0} = 2 \div 2,5; \quad 1,1 \leq \frac{L_0}{d_0} \leq 3,0. \quad (1)$$

Данные условия позволили исследовать трансформации волн различной интенсивности на различных моделях местных сужений. Параметры генерируемой волны изменились в следующих диапазонах:

$$0,1 \leq \frac{h_0}{d_0} \leq 0,6; \quad 12 \leq \frac{\lambda_0}{h_0} \leq 100; \quad 15 \leq \frac{\lambda_0}{d_0} \leq 50, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – длина исходной волны.

Экспериментальная модель оградительных сооружений различной конфигурации в боковом разрезе (рис. 3) и в плане (рис. 4) позволяла провести исследование прохождения непрерывных волн через различные виды местных преград, которые имеют место в реальных условиях при строительстве каналов и морских портов.

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

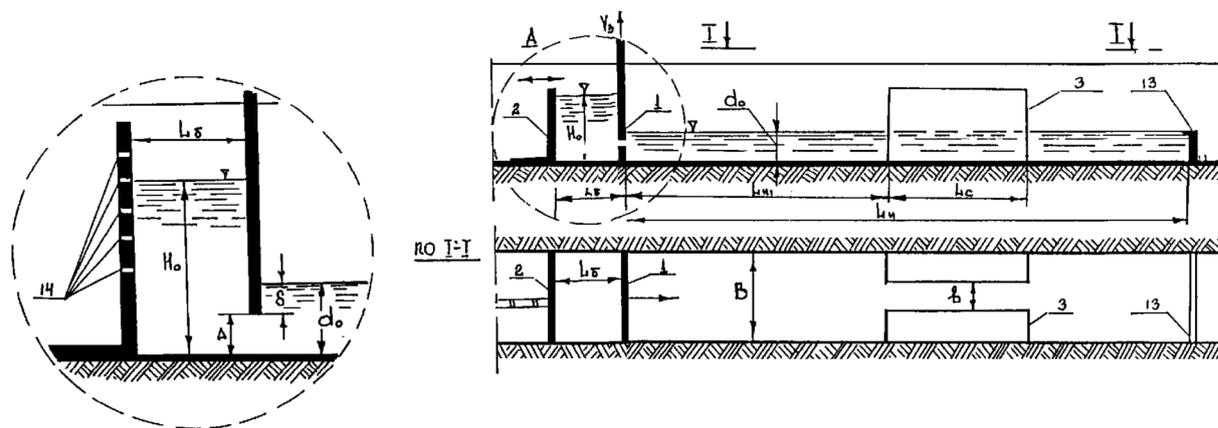


Рис. 1. Волнопродуктор гладкой (уединенной) волны

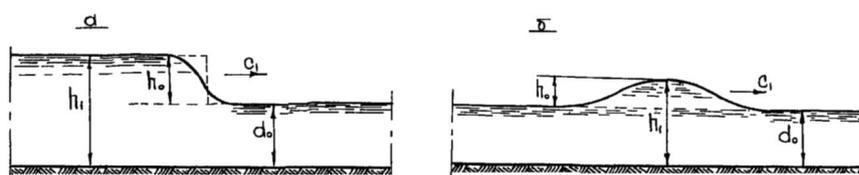


Рис. 2. Виды исследуемой волны:  
а - прерывная; б - непрерывная гладкая (уединенная)

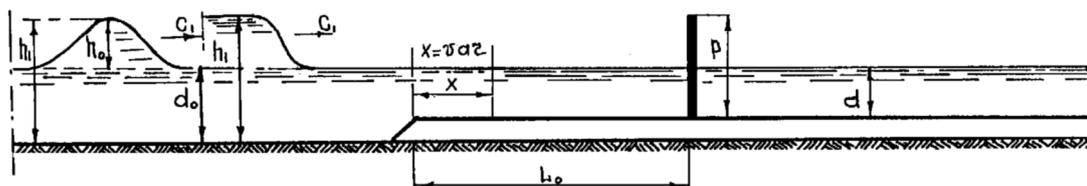


Рис. 3. Боковой разрез экспериментальной модели

дно [1, 3, 4]. Экспериментально было выбрано такое соотношение глубин, которое приводило к обрушению непрерывной волны над затопленной моделью при отходе от уступа на расстояние

$$\frac{x}{\lambda_0} = 1,5$$

Соотношение глубин для проводимого нами эксперимента составляло

$$0,2 \leq \frac{d}{d_0} \leq 0,7, \tag{3}$$

и было выбрано следующее рабочее соотношение, численно равное

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

На фальшь-дно укладывались 10 стальных плит размером (a=400; b=400; m=8) мм и дополнительно две плиты: (a=400; b=200; m=8) мм и (a=400; b=100; m=8) мм. На четырех рабочих плитах были выполнены пазы шириной 2 мм и глубиной 6 мм. В плане схема фрезерных канавок на рабочих плитах соответство-

вала всем схемам местных сужений (рис. 4), на которых предстояло провести исследования процессов трансформации волны. В каналах этих рабочих плит устанавливались стальные пластины, высота которых в первом случае позволяла падающей уединенной волне переливаться через гребень

$$0,5 \leq \frac{P-d}{h_0} \leq 1,7, \tag{4}$$

где P – высота пластины.

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

$$1,7 \leq \frac{P-d}{h_0} \leq 6,0. \tag{5}$$

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

$$b/B = 0,27. \tag{6}$$

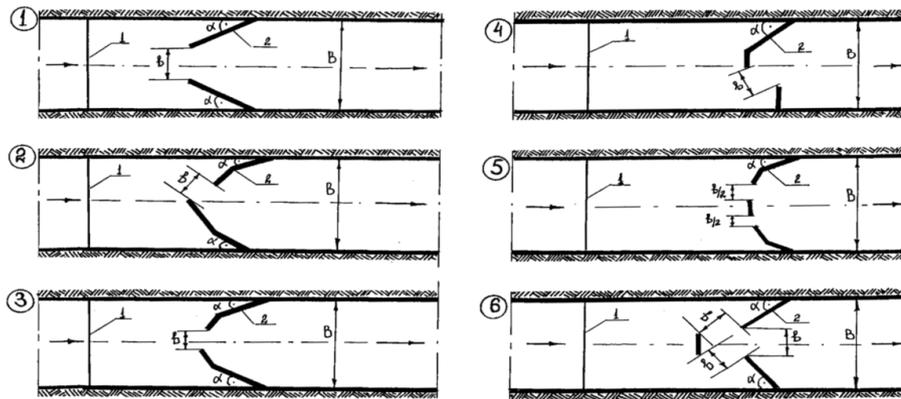


Рис. 4. Типы исследуемых моделей оградительных сооружений:  
1 – уступ; 2 – оградительное сооружение

Длины пластин для каждой рассматриваемой модели местных сужений подбирались индивидуально, с учетом условия (6) и плотного прилегания к стенкам лотка.

Данные условия (4), (5), (6) были постоянны при масштабном увеличении в два раза ( $h_{02}, \lambda_{02}, d_{02}$ ).

Разработанная конструкция экспериментальной установки позволяла провести 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, при этом соотношения ( $L_0/\lambda_0$ ) изменяются в интервале

$$0,1 \leq \frac{L_0}{\lambda_0} \leq 0,3, \quad (7)$$

где проводились исследования трансформации необрушенных волн, а на удалении  $L_0=0,90$  м исследовалась трансформация уединенной обрушенной волны. Здесь соотношение ( $L_0/\lambda_0$ ) изменялось в следующем интервале:

$$0,6 \leq \frac{L_0}{\lambda_0} \leq 1,5. \quad (8)$$

Перед уступом установки размещался откос (рис. 3) с углом  $\alpha=30^\circ$ . Данное значение сохранялось и в сериях опытов при масштабном увеличении. При проведении экспериментов, а также при масштабном увеличении постоянными величинами являлись следующие параметры модели и волн:

$$\begin{aligned} b/B &= 0,27 = const; \\ d_1/d_{0_2} &= d_2/d_{0_2} = d_3/d_{0_3} = const; \\ h_{0_1}/d_{0_1} &= h_{0_2}/d_{0_2} = h_{0_3}/d_{0_3} = const. \end{aligned} \quad (9)$$

Методика генерации волн с помощью гидродинамического волнопродуктора позволяла получать различные типы волн с заранее заданными параметрами

$$h_0/d_0; \quad \lambda_0/h_0; \quad \frac{u}{\sqrt{g(h_0+d_0)}}.$$

Значения этих соотношений, полученных при выполнении наших экспериментов, по сравнению с результатами инженера А.С. Сильченко не превышали (2-3) %.

В опытах высота местных преград выбиралась исходя из условий отражения и перелива волны через стенку [1, 9]. Основным аргументом выбиралось возвышение стенки над ординарным уровнем воды, т.е.  $(p-d)$ , значения которых в реальных условиях составляют

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

ших моделях.

В качестве конечных результатов рассматривался коэффициент ослабления волн ( $K$ ) на различных схемах местных сужений

$$K_{ос} = \frac{h_{np.} - d}{h_1 - d_0}, \quad (10)$$

где  $h_{np.}$  – глубина прошедшей волны;

$K_{ос}$  – коэффициент ослабления волн.

С целью исследования различных типов волн местные сужения различной конфигурации устанавливались на некотором расстоянии от уступа [1], что способствовало (так же как и в реальных условиях) преждевременному обрушению исходной гладкой волны.

При исследовании трансформации необрушенной волны местные преграды были расположены на удалении

$$0,1 \leq \frac{L_0}{\lambda_0} \leq 0,3 \quad (11)$$

от уступа.

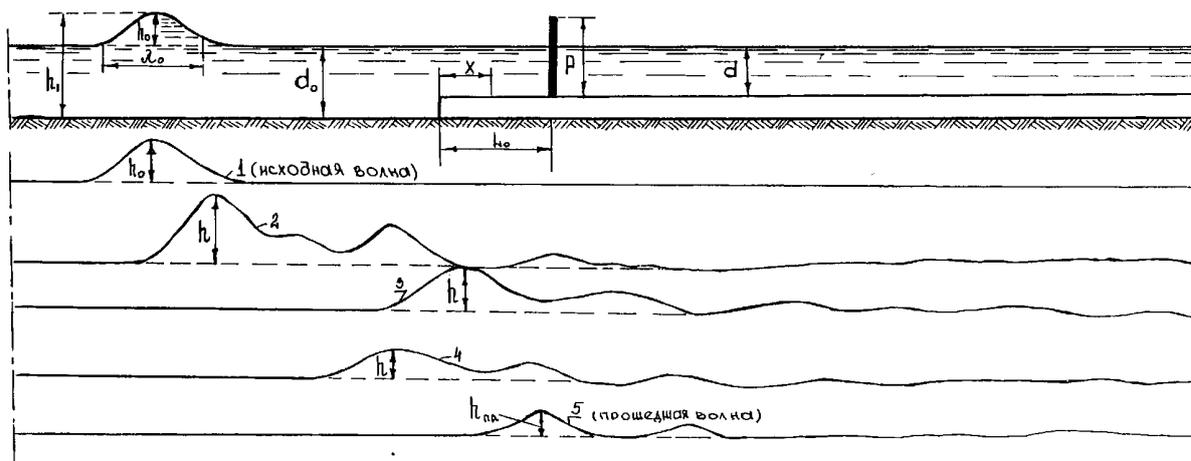


Рис. 5. Осциллограмма записи процесса трансформации необрушенной волны на уступе (сужение потока по схеме – на рис. 4):

1 – исходная волна; 2 – волна при выходе на уступ; 3 – на створе местного сужения; 4 – за сужением; 5 – после прохождения на удалении  $x/d = 34$  от уступа

Условие (11) было выбрано на основании полученных результатов по обрушению профиля гладкой волны на уступе [2]. Осциллограмма записи процесса трансформации необрушенной волны через местные сужения представлена на рис. 5 со следующими изменениями параметров модели и волн:

$$h_0 / d_0 = 0,48; \quad d / d_0 = 0,4; \quad \frac{p-d}{h_0} = 4,4. \quad (12)$$

На осциллограмме изображено изменение волны на месте изменения отметки дна и трансформация при прохождении через местное сужение. Перед выходом волны на уступ нами зафиксировались профиль волны и скорость ее фронта.

Основными аргументами, обуславливающими условия отсутствия и отражения падающей волны через гребень преграды, являлись соотношения  $p/h_0$  и  $\frac{p-d}{h_0}$ . Данные соотношения в случае отражения волны менялись в экспериментах в следующих диапазонах:

$$3 \leq \frac{p}{h_0} \leq 7; \quad 1,7 \leq \frac{p-d}{h_0} \leq 6,0. \quad (13)$$

Процесс трансформации волны сопровождался подъемом поверхности волны у стенок ограждающих сооружений. Возвышение поверхности у стенки в зависимости от интенсивности исходной волны в нашем случае отличалось от результатов В.Х. Давлетшина, Н.И. Заградской и Р.И. Демченко для вертикальной стенки с переливом.

Данное расхождение результатов обуславливается тем, что в нашем случае исследовалось местное

сужение различного расположения с входным отверстием для пропуска волнового потока. Изменение расположения местных сужений приводило к заметному изменению высоты подъема воды у стенок сооружений.

Полученные результаты в этом случае позволили разместить местные сужения по очередности в зависимости от высоты подъема воды у их стенок. Экспериментально полученная картина представлена на рис. 6.

На удалении  $x/d = 34$  от уступа (данное соотношение во всех случаях держалось постоянным) определялся коэффициент ослабления волны при различных расположениях ограждающих сооружений. На рис. 7 представлена экспериментальная оценка коэффициента ослабления и относительной высоты исходной волны после прохождения через местные сужения различного расположения при  $h_0/d_0 = 0,48$  и  $d/d_0 = 0,4$ . Полученная картина показывает, что коэффициент ослабления

$$\left( k = \frac{h_{пр} - d}{h_1 - d_0} \right)$$

от 0,55 снижается до 0,25 в зависимости от расположения ограждающих сооружений.

При выходе волны на уступе нами также рассматривался перелив волны через стенки местных сужений. Место расположения местных сужений в этом случае также определялось по условию (11). Основными параметрами, определяющими перелив падающей волны, естественно, являлись соотношения  $P/h_0$  и  $h_0/(p-d)$ . Они в этом случае изменились в следующих интервалах:

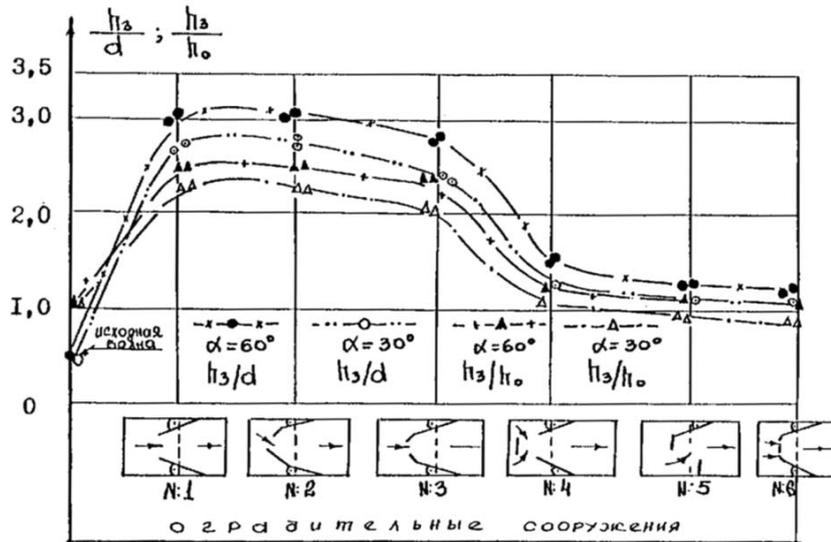


Рис. 6. Оценка изменения высоты заплеска уединённой необрушенной волны на оградительные сооружения при  $h_0/d_0 = 0.48$ ;  $(p - d)/h_0 = 2.0$

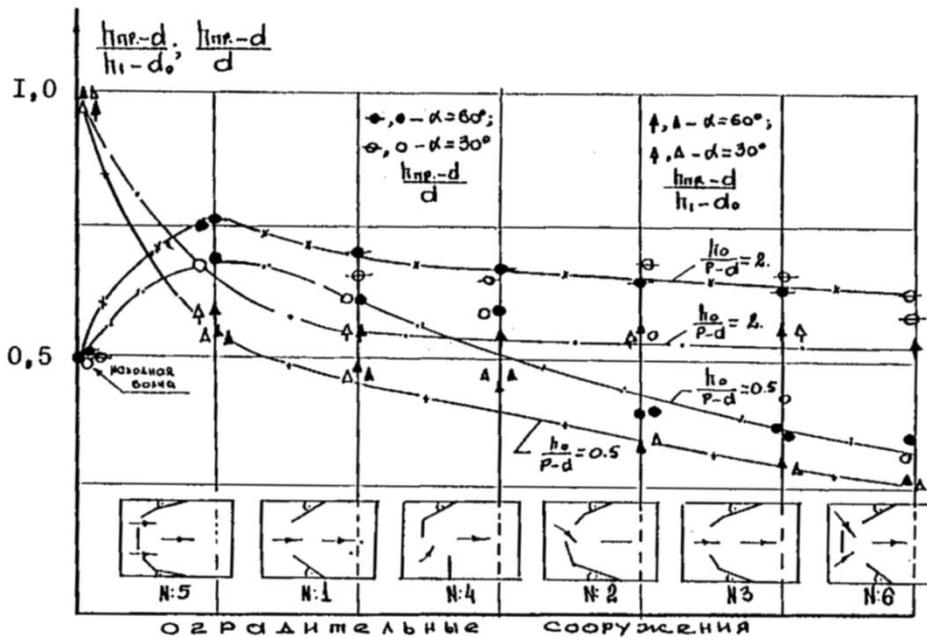


Рис. 7. Оценка изменения высоты уединённой необрушенной волны после прохождения через оградительные сооружения при  $h_0/d_0 = 0.48$

$$0,5 \leq \frac{p-d}{h_0} < 1,7 \quad \text{и} \quad 1 \leq P/h_0 < 3. \quad (14)$$

Оценка экспериментальных результатов по трансформации необрушенной волны на различных моделях местных сужений при условии перелива также представлена на рис. 7. Коэффициент ослабления волн  $\kappa_{ос}$  в данном случае резко изменился. Изменения компоновочных схем местных сужений

оказали незаметное влияние на коэффициенты ослабления. Изменение наблюдалось от 0,55 до 0,5. Это обуславливается возрастанием высоты волны при наличии перелива через гребень местной преграды. Относительная высота прошедшей волны во всех случаях изменения схем оградительных сооружений также менялась незначительно, т.е.

$$\frac{h_{np} - d}{d} = 0,75 \div 0,62.$$

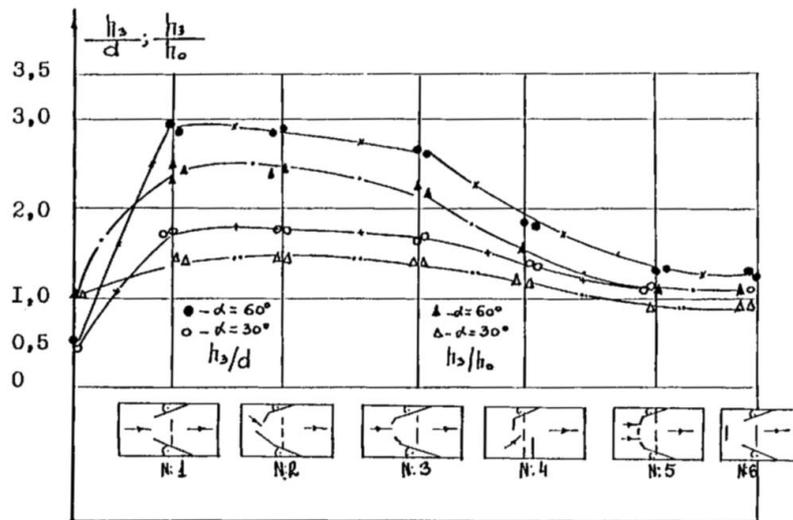


Рис. 8. Оценка изменения высоты заплеска уединённой обрушенной волны на оградительные сооружения при  $h_0/d_0 = 0.48$ ;  $h_0/(p-d) = 0.5$

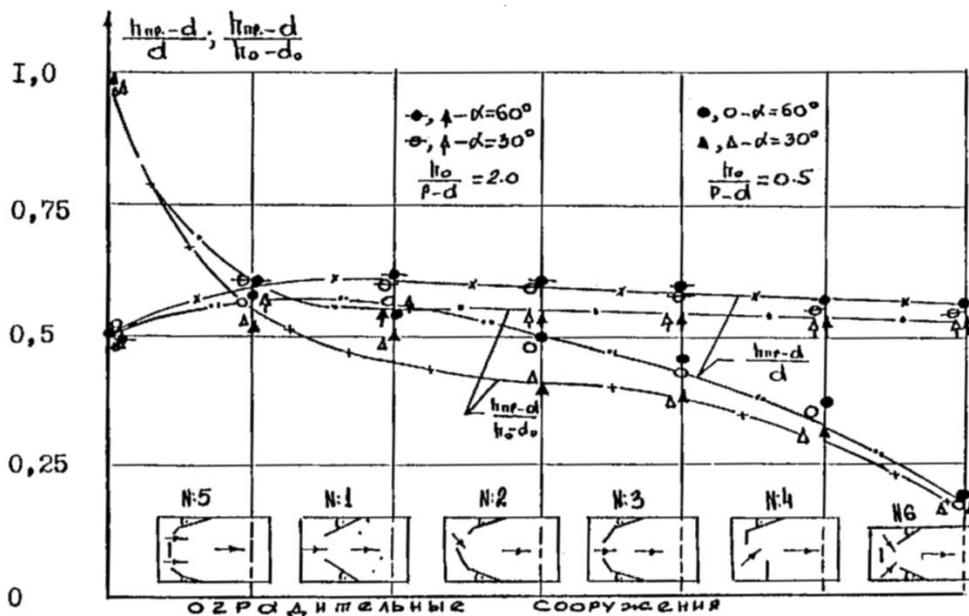


Рис. 9. Оценка изменения высоты уединённой обрушенной волны после прохождения через оградительные сооружения при  $h_0/d_0 = 0.48$

Осциллограмма записи процесса трансформации необрушенной волны при наличии перелива через местное сужение представлена на рис. 10.

Изменения параметров модели и волн по условиям (2), (3), (9) позволили нам исследовать процесс трансформации гладкой обрушенной волны через местные сужения различного расположения. Нами исследовались местные сужения при соотношении  $d/d_0 = 0.4$  (данное соотношение было выбрано исходя из результатов, представленных на рис. 10). Они уста-

навливались на удалении  $\frac{x}{d} = \frac{L_0}{d} = 21$  от уступа, т.е.

$$L_0/d > x^*/\lambda_0, \tag{15}$$

что дало возможность волне обрушиться до ее прихода к местным преградам.

На рис. 8 показаны изменения относительной высоты заплеска волны на створе местных сужений различного расположения. Данный график показывает, что высота подъема воды здесь меньше, чем в случае подъема уровня при отсутствии обрушения

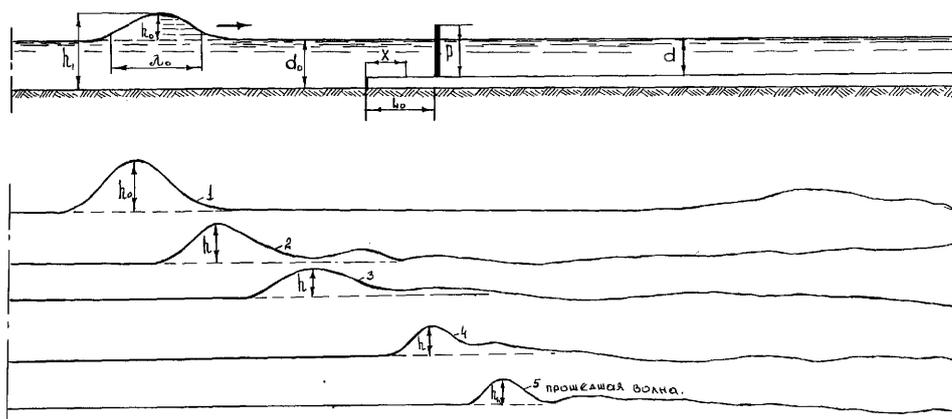


Рис. 10. Осциллограмма записи процесса трансформации необрушенной волны при наличии перелива через местное сужение (схема 6 на рис. 4): 1 – исходная волна; 2 – волна при выходе на уступ; 3 – на створе местного сужения; 4 – за сооружением; 5 – на удалении  $x/d = 34$  от уступа

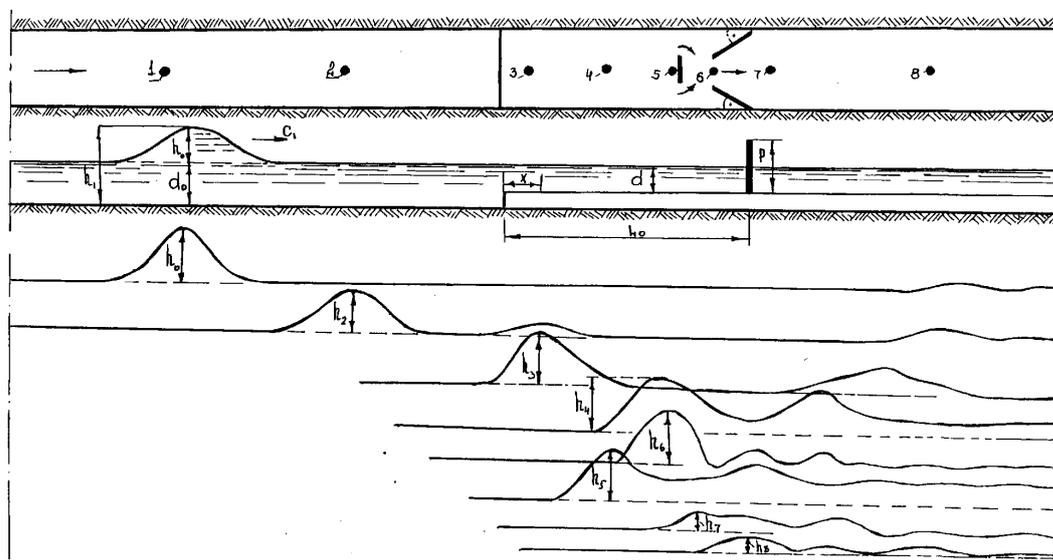


Рис. 11. Осциллограмма записи процесса трансформации обрушенной волны:  
● - датчики уровня

волны. Результаты изменения высоты заплеска необрушенной уединенной волны представлены на рис. 6. Экспериментальная оценка изменения коэффициента ослабления волн и относительной высоты после прохождения через местные сужения различного расположения при  $h_0/d_0 = 0,48$  представлена на рис. 9. Полученная картина позволила выявить более эффективный вариант расположения местных сужений в реальных условиях. На графике видно, что более эффективными оказались оградительные сооружения №6 и №4. Коэффициент ослабления волн ( $k_{oc}$ ) в этом случае на 27 % (для сооружения №4) и на 32 % (для сооружения №6) снизились по сравнению с результатами, представленными на рис. 7

для необрушенной волны. Осциллограмма записи процесса трансформации обрушенной волны, при изменении параметров по условию (12), представлена на рис. 11.

Полученные картины трансформации обрушенной волны позволили нам экспериментально получить значения коэффициента ослабления волн для местных сужений различного расположения в виде эмпирической зависимости

$$\frac{h_{mp} - d}{h_1 - d_0} = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n, \quad (16)$$

где значения  $A$  и  $n$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов для эмпирических формул

Номер рисунка	Вид эмпирической зависимости	Номер схемы местного сужения	A	n	Тип волны
13	$\frac{h_{np} - d}{d} = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n$ (формула (17))	1	1,27	1,0	Гладкая обрушенная
		2	0,75	0,7	
		3	0,8	0,87	
		4	0,68	0,65	
		5	1,13	0,96	
		6	0,3	0,48	
12	$\frac{h_{np} - d}{h_1 - d_0} = A \left( \frac{h_1 - d_0}{d_0} \right)^n$ (формула (16))	1	0,62	0,2	Гладкая обрушенная
		2	0,39	-0,08	
		3	0,4	-0,07	
		4	0,39	-0,12	
		5	0,6	0,17	
		6	0,35	-0,16	

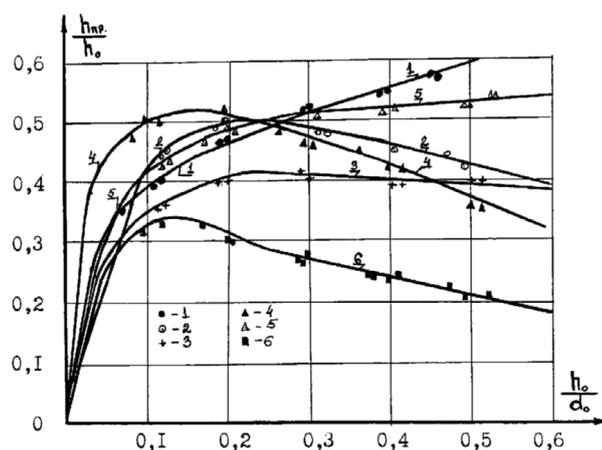


Рис. 12. Зависимость коэффициента ослабления гладкой обрушенной волны от интенсивности, подходящей для различных схем местных сужений (цифрами обозначены номера схем местных сужений - см. рис. 4)

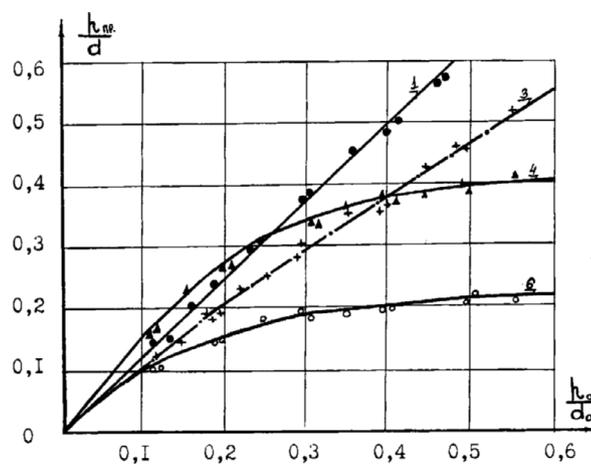


Рис. 13. Зависимость высоты прошедшей гладкой обрушенной волны от интенсивности подходящей волны для различных компоновочных схем

Полученная зависимость представлена на рис. 12 и позволяет определить коэффициент ослабления волн для местного сужения любого расположения в зависимости от интенсивности подходящих волн.

На рис. 13 представлена зависимость в виде

$$\frac{h_{np} - d}{d} = f\left(\frac{h_1 - d_0}{d_0}\right) \quad \text{при } d/d_0 = 0,4. \quad (17)$$

Значения  $A$  и  $n$  приведены в табл.1 и принимаются с учетом конфигурации местных сужений.

Полученные экспериментальные результаты позволяют выделить эффективные варианты компоновки местных сужений для каждого случая волнения в выборе данных при выполнении других расчетов гидротехнических объектов.

**Выводы.** Разработана экспериментальная модель, позволяющая провести исследования по прохождению различных типов волн через оградительные сооружения различной конфигурации. Полученные экспериментальные результаты позволили выявить коэффициенты ослабления гладкой обрушенной и необрушенной волн, проходящих через оградительные сооружения различной конфигурации. Методом математической обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости, устанавливающие связь между параметрами исходной и прошедшей волн через оградительные сооружения различной конфигурации. Установлено, что ослабление гладкой обрушенной волны на местных преградах превышает необрушенную волну в пределах 27-32 %. Экспериментально доказано, что места расположения местных преград существенно влияют на параметры длинных волн. Полученные экспериментальные результаты позволили разработать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров гладких волн при взаимодействии с оградительными сооружениями различ-

Об авторе:

**САЙРИДДИНОВ Сайридин Шахобович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетических машин и систем управления Тольяттинский государственный университет 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Ушакова, 59, тел. (8482) 53-91-35  
E-mail: mrssa@yandex.ru

ной конфигурации и совершенствовать методику расчета и проектирования объектов гидротехники, водоснабжения и водоотведения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайридинов С.Ш. Прохождение длинных волн через разные формы сжатия в открытых руслах: дис. ... к.т.н. М., 1991. 150 с.
2. Сайридинов С.Ш. О коэффициенте расхода местных боковых преград в открытых руслах при пропуске прерывных волн перемещения различной интенсивности // Природоресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сб. МНПК. Пенза: МНИЦ, 2005. С. 207–211.
3. Сайридинов С.Ш. Нестационарные течения в открытых руслах с водосливными преградами // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». М., 2011. №2. С. 62-66.
4. Сайридинов С.Ш. Исследование параметров нестационарного водного потока в зоне растекания за водосливной преградой // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. Вып. № 4(12). С. 44-48.
5. Сайридинов С.Ш. Экспериментальное исследование движения волнового потока в открытых руслах с резким изменением отметки дна // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. Вып. № 3(16). С. 66-72.
6. Сайридинов С.Ш. О режимах течения волнового потока при взаимодействии с местными боковыми преградами в открытых руслах // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение городов Поволжья. Тольятти, 2004. С. 278-283.
7. Сайридинов С.Ш. Исследование течения прерывного волнового потока в открытых руслах с местными боковыми преградами // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. Вып. № 2(15). С. 63-70.
8. Сайридинов С.Ш. Течение прерывного волнового потока через оградительные сооружения различной конфигурации в открытых руслах// Вектор науки. Тольятти, 2014. Вып. № 1. С. 58-65.
9. Смирнова Е.Г., Правдивец Ю.П., Смирнов Г.Н. Берегозащитные сооружения. М.: АСВ, 2002. С. 130-166.

© Сайридинов С.Ш., 2014

#### SAYRIDDINOV Sayriddin

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Energy – Converting Machinery and Control Systems Chair Toliatti i State University 445667, Samara Region, Toliatti, Ushakova str., 59, tel. (8482) 53-91-35  
E-mail: mrssa@yandex.ru

Для цитирования: Сайридинов С.Ш. Течения гладкого (уединенного) волнового потока через оградительные сооружения различной конфигурации в открытых руслах// Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. Вып. № 4(17). С. 70-78.