

УДК 532.1:532.2:626.882.628.14

С.Ш. САЙРИДДИНОВ**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЛНОВОГО ПОТОКА В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ С РЕЗКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ОТМЕТКИ ДНА***AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE WAVE FLOW MOTION IN OPEN CHANNELS WITH A SHARP CHANGE IN THE BOTTOM LEVEL*

Представлены результаты экспериментальных исследований, позволяющие давать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров волн при взаимодействии с местным вертикальным сужением русла и совершенствовать методику расчета и проектирования объектов гидротехники, водоснабжения и водоотведения.

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

Известно, что в реальных условиях встречаются каналы и другие гидротехнические объекты, где движущийся волновой поток испытывает резкую деформацию по вертикали, что приводит к значительному изменению структуры и параметров волнового потока. К таким явлениям, например, относятся выход волны на мелководье [1, 4, 7], где волна чувствует влияние дна берега, процесс выпуска ила по поперечному сечению канала, вследствие чего меняются отметки дна, и тому подобные случаи. В нашей работе данная задача решалась экспериментально. Экспериментальная часть работы была выполнена на гидравлическом лотке, имеющем длину 90 м, состоящем из следующих узлов (рис. 1).

В процессе эксперимента использовались волнопродукторы, с помощью которых были получены прерывные и гладкие волны [2, 3].

Прерывные волны были получены путем быстрого открытия затвора (рис. 2). Скорости подъема затвора в диапазонах 0,5÷8,0 м/с не оказывали заметного влияния на форму генерируемой волны. В наших опытах скорости подъема затвора изменялись в пределах от 1 до 2,5 м/с [4, 5].

В процессе работы с гидрозатвором были использованы две предложенные нами физические схемы, которые позволяли регистрировать время подъема затвора до выхода из потока воды и сам процесс

Presents the results of experimental research which allow to give engineering-based recommendations about determination of waves characteristics in interaction with local vertical narrowing of the riverbed and improve methods of calculation and designing of hydraulic and engineering objects, water supply and drainage system.

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

его движения (см. 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 (рис. 3) $\frac{L_0}{L_i} \geq 1,2 \div 1,7$.

Интенсивность прерывной волны в опытах изменялась в следующем интервале:

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

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. 5, а).

Непрерывные волны (рис. 5, б) генерировались с помощью второго типа гидродинамического волнопродуктора (рис. 4). Волнопродуктор был снабжен гидравлическим затвором и призматическим баком, изменение параметров которого позволило получать волны указанного типа различной высоты (h_0) и длины (λ_0).

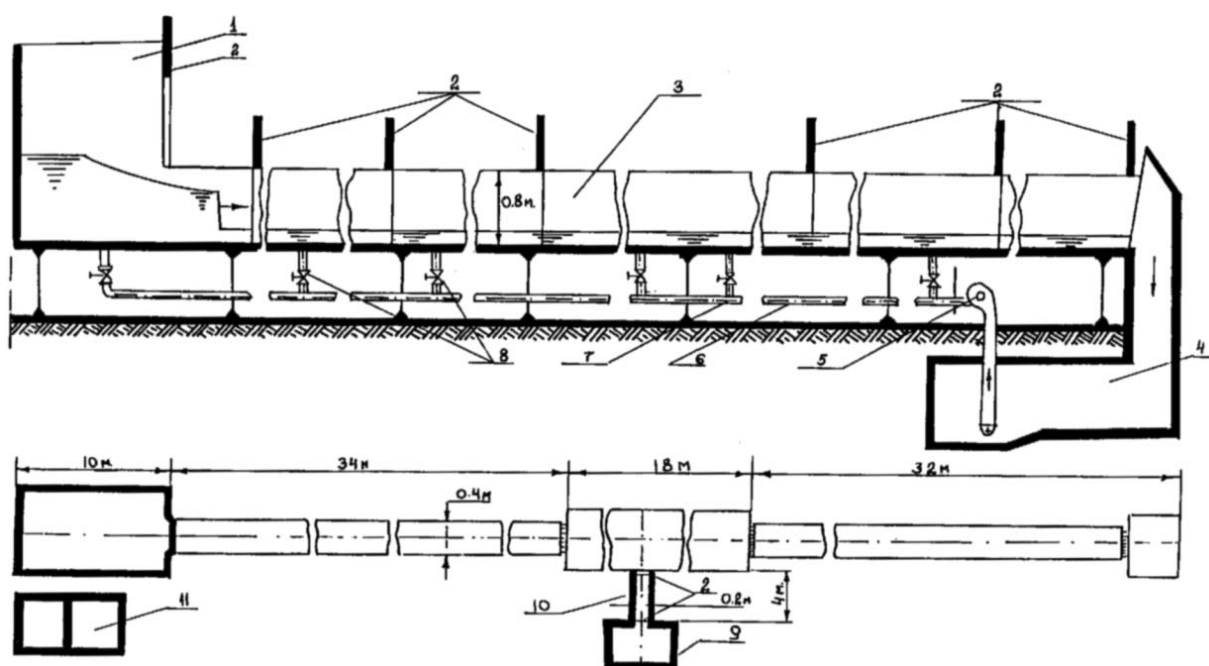


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – напорный бак вместимостью 35 м³; 2 – устройство для формирования длинных волн (затворы) в количестве 9 шт.; 3 – основной стекланный лоток длиной 74 м с изменением ширины от 0,4 до 1,6 м; 4 – нижний приемный бак вместимостью 40 м³; 5 – две насосные установки с общим расходом $Q=0,2$ м³/с; 6 – основной возвратный напорный трубопровод диаметром 200 мм; 7 – вспомогательные трубопроводы; 8 – задвижки с электроприводами; 9 – малый напорный бак вместимостью 4 м³; 10 – малый стекланный лоток длиной 4,5 м, шириной 0,2 м и глубиной 0,8 м; 11 – пульт управления стендом с автоматизированной записью измеряемых параметров

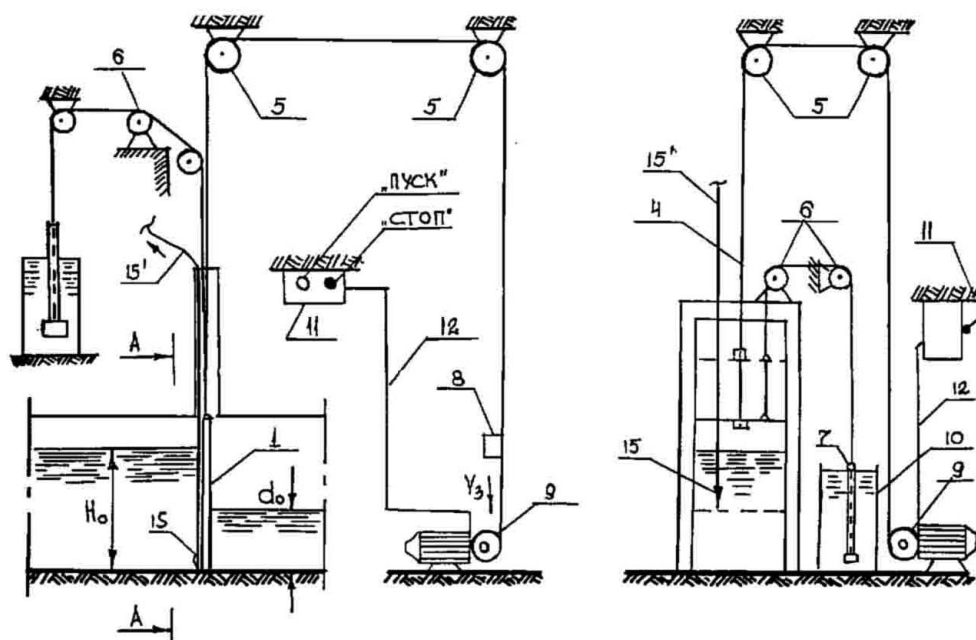


Рис. 2. Схема электрического гидрозатвора (данные обозначения также действительны для рис. 3 и 4): 1 – затвор из алюминия; 2 – подвижная стенка верхнего бака волнопродуктора; 3 – модель местного сужения; 4 – стальной трос; 5, 6 – блоки; 7 – чувствительный элемент уровнемера; 8 – зажим на конце троса; 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; 15¹ – провод, подающий в осциллограф сигнал момента отсоединения затвора от потока воды

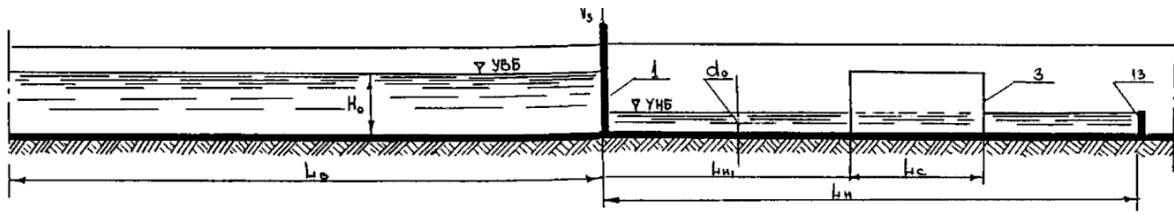


Рис.3. Соотношения глубин верхней и нижней части гидроротка

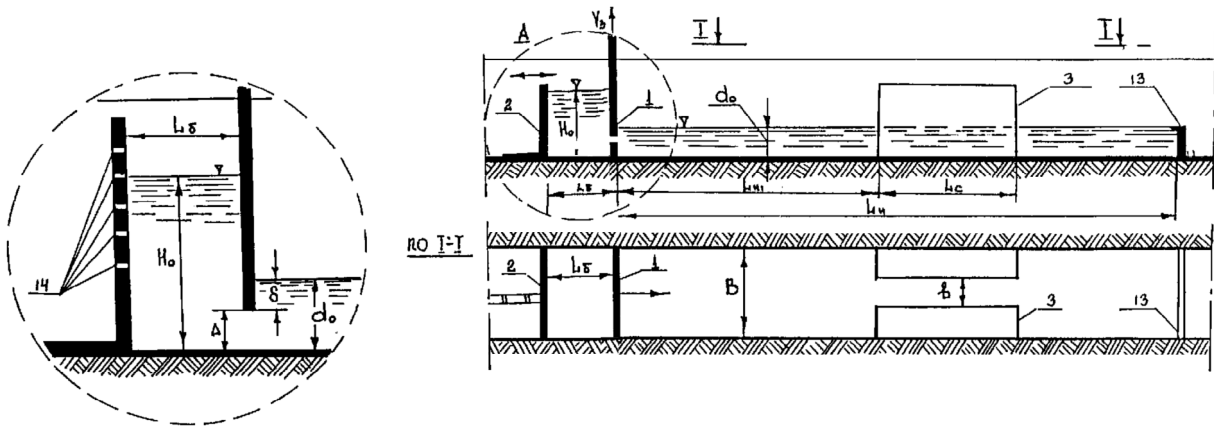


Рис. 4. Волнопродуктор гладких волн

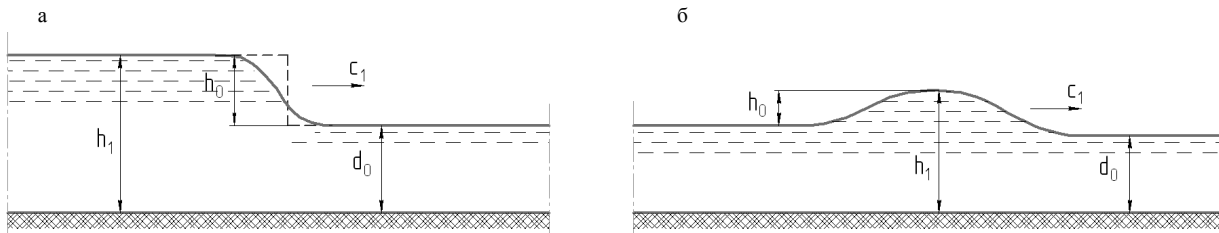


Рис. 5. Виды исследуемых волн: а – прерывная; б – уединенная (гладкая)

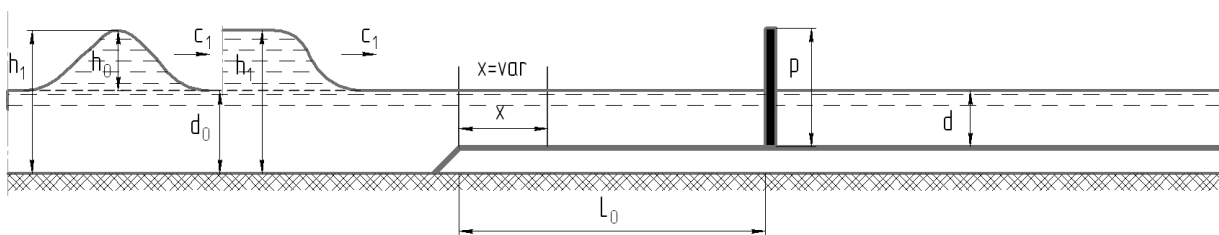


Рис. 6. Схема изменения отметки дна канала

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

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

Данные условия позволили исследовать трансформации волн различной интенсивности на различных моделях местных сужений. Параметры

генерируемой волны изменялись 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 λ_0 – длина исходной волны.

На определенном створе устанавливались приборы, с помощью которых регистрировались динамические процессы, происходящие при прохожде-

нии длинных обрушенных и необрушенных волн. Модель вертикального сужения потока представлена на рис. 6. На данной модели предусматривалось провести исследования трансформации непрерывных и прерывных волн в каналах с изменением отметки дна, которые имеют место в реальных условиях.

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. 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

$$0,2 \leq \frac{d}{d_0} \leq 0,7, \quad (3)$$

и было выбрано рабочее соотношение, численно равное $d/d_0=0,4$. При постановке задачи более интересно было рассматривать процесс движения гладкой волны на участке с резким изменением отметки дна. После выхода волны на таких участках наблюдалась резкая ее трансформация. Исследование процесса трансформации волны было проведено в диапазоне изменения параметров волны и уступа по условиям (2) и (3). Результаты экспериментальных исследований по выявлению места разрушения гладкой волны в зависимости от интенсивности исходной волны при различных соотношениях d/d_0 в двух вариантах представлены на рис. 7, 8.

Обработка результатов эксперимента позволила получить эмпирические формулы (4), которые позволяют определить длину от места изменения отметки дна русла до места обрушения гладкой волны (рис. 7) в зависимости от изменения параметров подходящего волнового потока:

$$\begin{aligned} 1. \frac{x^*}{\lambda_0} &= 0,045961 \left(\frac{h_0}{d_0} - 0,19222 \right)^{-0,86083}; \\ 2. \frac{x^*}{\lambda_0} &= 0,236352 \left(\frac{h_0}{d_0} - 0,175608 \right)^{-0,5721}; \\ 3. \frac{x^*}{\lambda_0} &= 0,428391 \left(\frac{h_0}{d_0} - 0,197033 \right)^{-0,40873}; \\ 4. \frac{x^*}{\lambda_0} &= 0,499281 \left(\frac{h_0}{d_0} - 0,216876 \right)^{-0,55808}. \end{aligned} \quad (4)$$

При большом пороге ($d/d_0 = 0,22$) уединенная волна начала обрушиваться на близком расстоянии от порога, т.е. $x^*/\lambda_0 = 0,1$ (при $h_0/d_0 = 0,48$), и увеличилась до $x^*/\lambda_0 = 1,4$ при снижении относительной высоты исходной волны до $h_0/d_0 = 0,2$. При таком пороге в наших экспериментах не было зафиксировано обрушение уединенной волны с относительной высоты $h_0/d_0 = 0,2$ и меньше.

Дальнейшее уменьшение высоты порога (d/d_0) приводило к увеличению расстояния от уступа, на который обрушивалась уединенная волна. При $d/d_0 = 0,32$ обрушения наблюдались от $x^*/\lambda_0 = 0,45$ (при $h_0/d_0 = 0,48$) до $x^*/\lambda_0 = 2,2$ (при $h_0/d_0 = 0,2$), а при $d/d_0 = 0,4$ значения (x^*/λ_0) соответственно изменились от 0,7 (при $h_0/d_0 = 0,48$) до 2,9 (при $h_0/d_0 = 0,2$). При малом пороге ($d/d_0 = 0,5$) недостаточной была длина уступа (L), на которую должна была обрушиваться волна.

Полученные экспериментальные результаты по обрушению волны при изменении отметки дна канала в виде $x^*/d_0 = f(h_0/d_0)$ в разных вариантах изменения высоты уступа представлены на рис.8. Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирическую формулу (5), позволяющую аппроксимировать экспериментальные результаты. Как видно из представленных зависимостей, исходная волна различной интенсивности образовалась на различных расстояниях (x/d) от места изменения отметки дна канала.

Полученные результаты показали, что на процесс обрушения волны значительное влияние оказывают соотношение d/d_0 и относительная высота исходной волны h_0/d_0 . Место обрушения волны в зависимости от изменения высоты уступа в этом случае определяется по полученной нами эмпирической формуле в следующем виде:

$$\frac{x^*}{d} = \left(\frac{k}{h_0/d_0} \right)^{1/n}, \quad (5)$$

где значения k и n в зависимости от d/d_0 изменялись следующим образом:

d/d_0	k	n
0,22	0,55	0,31
0,32	1,03	0,45
0,4	1,22	0,45
0,5	2,28	0,56

Достоверности измерения параметров волны оценивались по известным теоретическим и экспериментальным результатам по распаду произвольного разрыва в диапазоне изменения ее интенсивности. На рис. 9 представлена зависимость скорости

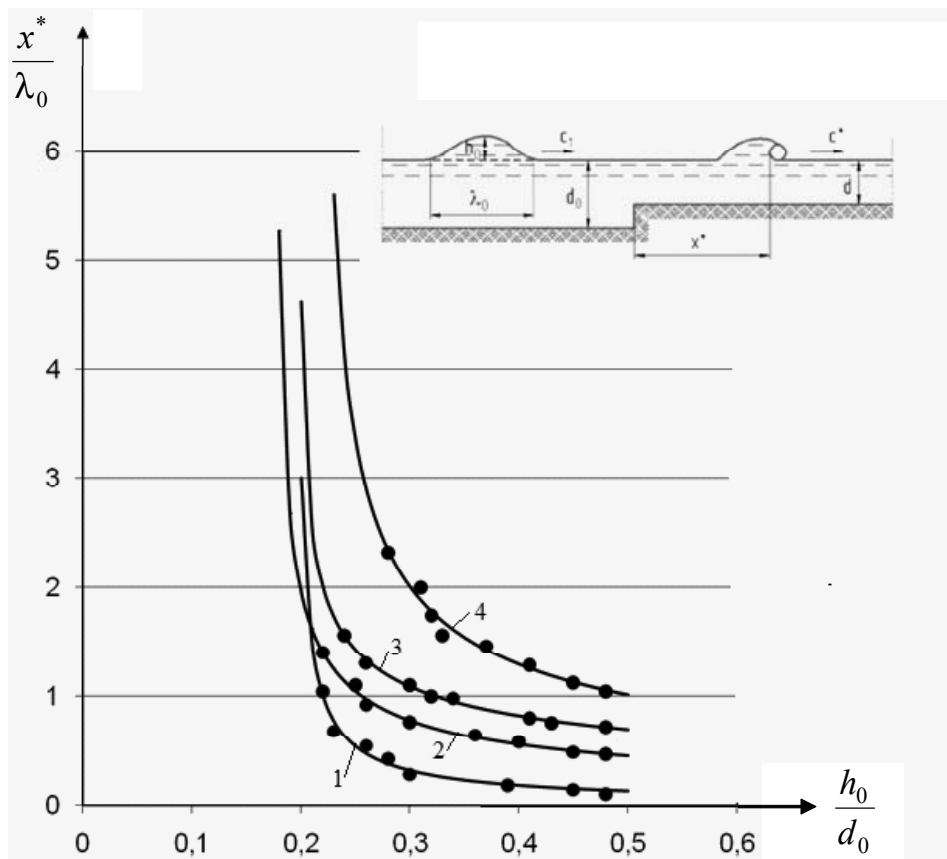


Рис. 7. Обрушение гладкой волны на уступе в зависимости от высоты подходящей волны при различных значениях d/d_0 :
 1 - $d/d_0=0,22$; 2 - $d/d_0=0,32$; 3 - $d/d_0=0,4$; 4 - $d/d_0=0,5$

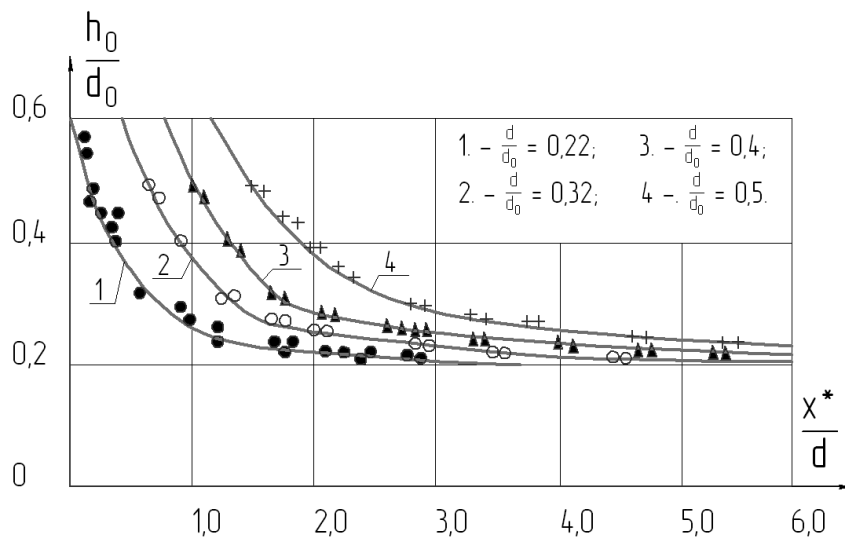


Рис. 8. Обрушение гладкой волны на уступе:
 1 - $d/d_0=0,22$; 2 - $d/d_0=0,32$; 3 - $d/d_0=0,4$; 4 - $d/d_0=0,5$

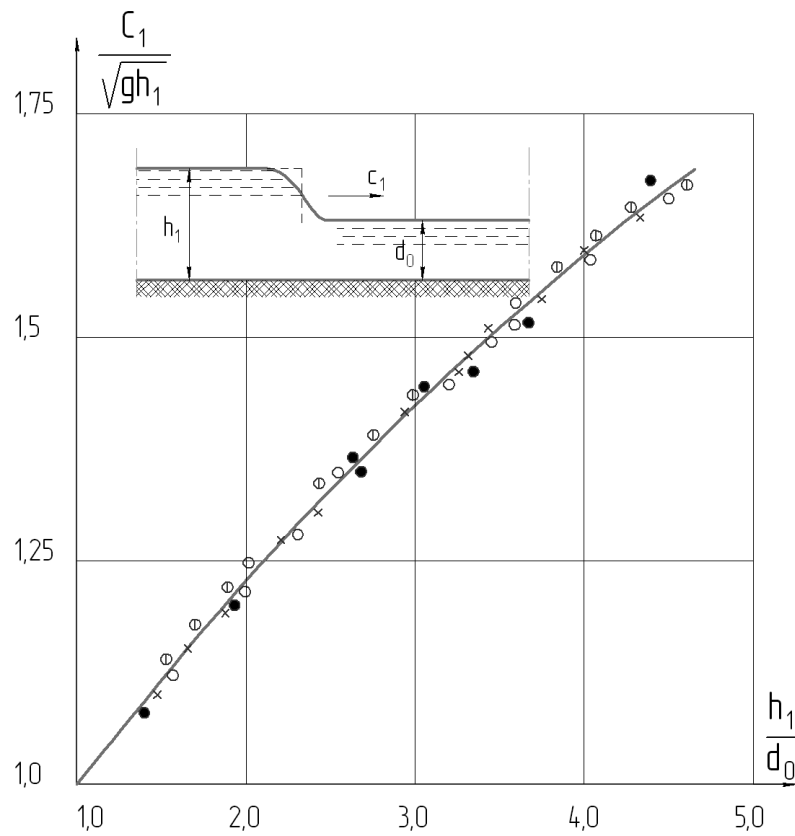


Рис. 9. Зависимость скорости фронта подходящей волны от ее интенсивности (здесь ● - $d_0 = (5,0 \div 5,6)$ см - автор; ○ - $d_0 = (7,2 \div 7,5)$ см - автор; — - по формуле (6); ○(штрих) - по работе [6]; x - по работе [5])

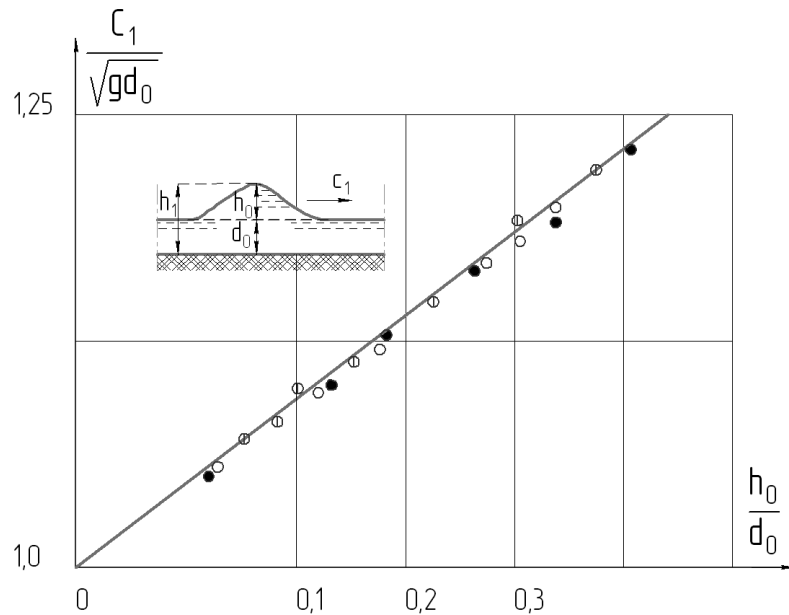


Рис. 10. Зависимость скорости фронта подходящей волны от ее интенсивности (здесь ● - $d_0 = 8,1$ см - автор; ○ - $d_0 = 16$ см - автор; — - по формуле (7); ○(штрих) - по работе [6])

фронта волны от ее интенсивности. Совпадение результатов наших измерений с теоретической кривой, полученной по формуле

$$C_1 / \sqrt{gh_1} = \sqrt{\frac{h_1 + d_0}{2d_0}}, \quad (6)$$

и результатами измерения других авторов свидетельствуют о достоверности измеренных нами параметров исходной прерывной волны.

Измерения параметров профиля непрерывной (гладкой) волны проверялись по теоретическому решению в виде $h/h_0 = ch^{-2} T$ и экспериментальным данным [6]. Сравнение результатов показало удовлетворительное совпадение. На рис.10 представлены измеренные нами скорости фронта гладкой волны при изменении ее интенсивности. Сравнение измеренных глубин и скоростей с результатами автора [6] и по классической формуле в виде

$$C = \sqrt{g(h_0 + d_0)} \quad (7)$$

показало удовлетворительное совпадение и достоверность проведения наших экспериментов.

Выводы. Экспериментально получены характеристики подходящей гладкой волны после изменения отметки дна канала, а также эмпирические формулы, позволяющие определить место обрушения волны при изменении отметки дна канала. Полученные результаты позволили нам провести исследования трансформации как обрушенных, так и необрушенных волн через оградительные сооружения различной конфигурации, которые сооружаются в акватории берега. Данные исследования будут представлены в последующих материалах.

Об авторе:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайриддинов 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.
2. Сайриддинов 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.
3. Сайриддинов С.Ш. Исследование течения прерывного волнового потока в открытых руслах с местными боковыми преградами // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. Вып. № 2(15). С. 63-71.
4. Сайриддинов С.Ш. Движение волны в каналах с резким изменением отметки дна // Сб. научных трудов Таджикского технического университета «Строительство и архитектура». Вып. 5. Душанбе, 1994. С. 78-83.
5. Саркисян В.А. Особенности отражения длинных волн от преград в открытых потоках: дис. ... к.т.н. М., 1988. 146 с.
6. Сильченко А.С. Накат волн на береговые откосы: дис. ... к.т.н. М., 1984. 177 с.
7. Смирнова Е.Г., Правдивец Ю.П., Смирнов Г.Н. Берегозащитные сооружения: учебник для вузов по специальности 2904.00 «Гидротехническое строительство». М.: АСВ, 2002. 302 с.

© Сайриддинов 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, Russia, Toliatti, Ushakova str., 59,
tel. (8482) 53-91-35
E-mail: Waterkafedra@mail.ru

Для цитирования: Сайриддинов 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.