

УДК 532.1:532.2:626.882.628.14

**С.Ш. САЙРИДДИНОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетических машин и систем управления  
Тольяттинский государственный университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВОДНОГО ПОТОКА  
В ЗОНЕ РАСТЕКАНИЯ ЗА ВОДОСЛИВНОЙ ПРЕГРАДОЙ**

NONSTATIONARY WATER FLOW PARAMETERS ANALYSIS IN THE FLOWING ZONE THAT IS PAST WEIR

*Экспериментально изучено течение бурного водного потока после прохождения через водосливы с широким порогом (боковое сужение русла). Получены инженерно обоснованные результаты по определению длины гидравлического прыжка и сопряженных глубин в зависимости от изменения геометрических факторов водосливной преграды.*

**Ключевые слова:** водослив, водосливная преграда, сужение русла, гидравлический прыжок, сопряженные глубины, критерий Фруда.

В настоящее время в практике гидротехнического строительства встречается значительное количество сооружений, частично перегораживающих русло водотоков, расчет которых потребует учет прохождения через них волн попуска.

К таким сооружениям, например, относятся мостовые переходы, которые имеют ряд особенностей по сравнению с другими гидротехническими сооружениями, существенно усложняющими расчеты. Это малые размеры отверстий моста по сравнению с шириной потока в паводок и большие скорости течения в отверстие моста. Аналогичная задача возникает также при взаимодействии длинных волн с оградительными сооружениями, частично загораживающими вход в порт.

Изменение расхода воды в створах гидроузлов, изменение режима работы ГЭС или насосных агрегатов приводят к образованию волн перемещения. В зависимости от способа образования, волны перемещения подразделяются на прерывные, непрерывные и волны ондуляции. Эти волны распространяются с большой скоростью на значительные расстояния и оказывают воздействие на береговые откосы, сооружения частично перегораживающих русло водотоков и других гидротехнических объектов.

Анализ состояния вопроса по трансформации длинных волн в открытых водотоках и их взаимодействия с преградами показывает, что разработаны

*Supercritical water flow passing through the broad-crested weir has been experimentally examined. Engineering-based results on hydraulic-jump wave length and conjugated depths measurement considering the weir geometrical characteristics changers.*

**Key words:** spill weir, weir, riverbed narrowing, hydraulic-jump wave, conjugated depths, Froude number.

численные и аналитические методы решения данной проблемы. Многочисленными экспериментальными результатами подтверждена правомерность использования этих методов, однако очень мало работ по изучению влияния бокового стеснения русла на параметре подходящего и прошедшего волнового потока. Не доказана обоснованность теоретических и экспериментальных результатов в случае бокового сжатия русла для различных типов волн и не определен предел изменения предлагаемых зависимостей. Не наблюдается сравнение экспериментальных и теоретических результатов по прошедшим волнам в случае бокового и вертикального сужения русла.

Известно, что в зоне растекания потока за сужением или после прохождения волны через преграды сильно изменяется скорость течения потока, а переход от одного состояния потока в другое возможен через образование гидравлического прыжка. Наиболее важной для практики является длина максимального отгона гидравлического прыжка, определяющая зону обмеления и, следовательно, вероятного размыва дна русла. Течение при взаимодействии прерывной волны с расширением в нижнем бьефе отличается от схематизированных решений тем, что по прошествии некоторого времени скорость сноса обращенного бора замедляется, глубина за его фронтом растет, затем направление его движения меняется на обратное и он постепенно приближает-

ся к створу излива. Таким образом, нестационарная картина течения вырождается в известную схему сопряжения бьефов со стационарным гидравлическим прыжком [5]. В реальных условиях при выходе высокоскоростного водного потока из узкой части канала в широкую часть образуются разные формы гидравлического прыжка, и, естественно, вопросы, связанные с определением гидравлических параметров совершенного прыжка, считаются весьма актуальными для специалистов гидротехнического профиля. В нашей работе представлены несколько реальных вариантов гидравлического прыжка, имеющих место в практике эксплуатации оросительных каналов (рис. 3).

За длину гидравлического прыжка обычно принимают лишь длину горизонтальной проекции поверхностного вальца. Поэтому точность определения длины гидравлического прыжка является весьма сложным процессом вследствие нарушения гидростатического распределения давления и распределения скоростей в этой области. Существуют различные формулы определения длины прыжка в прямоугольных руслах. Области применения этих формул определяются по конкретным значениям числа Фруда втекающего потока.

При рассмотрении взаимодействия прерывной волны с местным сужением русла различной степени необходимо было экспериментально определить

предельное значение соотношения сопряженных глубин ( $h_3, h_6$ ), при котором можно было бы установить минимальную длину гидравлического прыжка, когда совершенный гидравлический прыжок переходит в прыжок-волну.

Решение такой задачи вызвало ряд особенностей вследствие измерения сжатой глубины потока ( $h_3$ ) за местным сужением. Измерение сжатой глубины потока потребовало особого внимания, и было сделано следующее: при постоянной высоте подходящей волны и соотношении  $b/B$ , где  $b$  – ширина местного сужения;  $B$  – ширина канала (см. рис. 1), измерялась глубина в нескольких точках от створа излива до места образования поверхностного вальца (гидравлического прыжка) и в качестве сжатой глубины была принята наименьшая глубина среди измеренных; при изменении высоты подходящей волны и в последующих изменениях степени сужения подход был аналогичен вышеуказанному методу. Глубина за прыжком измерялась на участке выравнивания потока и в нескольких точках от места образования поверхностного вальца.

После обработки результатов измерения нами была получена зависимость соотношения сопряженных глубин из числа Фруда в сжатом сечении  $h_6/h_3=f(Fr_3)$ . Экспериментально полученные сопряженные глубины ( $h_3, h_6$ ) также оценивались по известной формуле сопряженных глубин [1-4]:

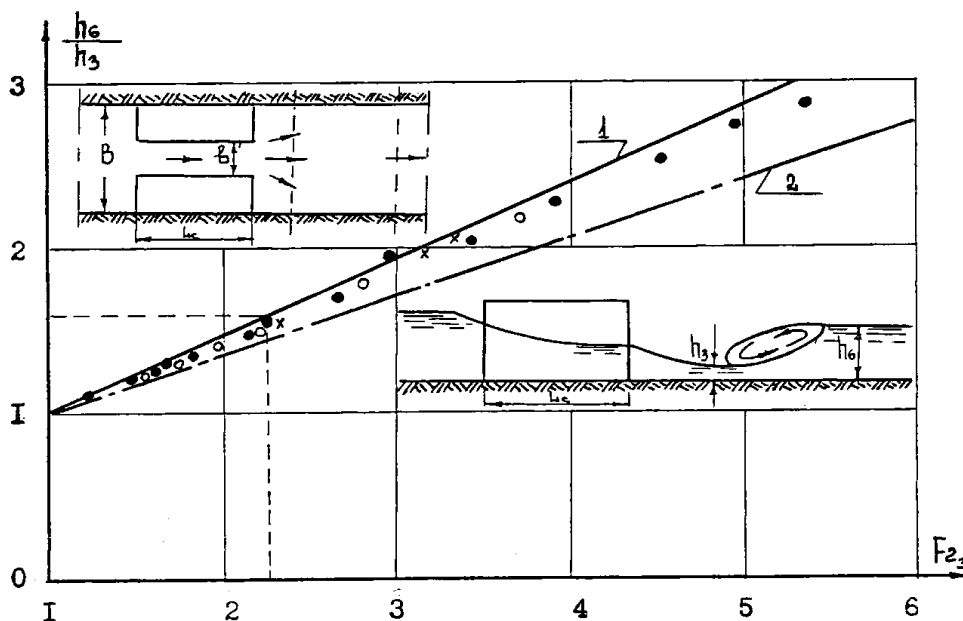


Рис. 1. Влияние числа Фруда ( $Fr_3$ ) на соотношения сопряженных глубин:  
 (•, ○, ×) – экспериментальные точки автора соответственно при  $\varepsilon = 0,27; 0,53; 0,77$ ;  
 — — по данным Г.К. Илчева; - - - по формуле А.И. Модзалевского (2)

$$\frac{h_6}{h_3} = 0,5(\sqrt{1 + 8Fr_3} - 1). \quad (1)$$

На рис. 1 представлены полученные нами экспериментальные результаты и результаты, полученные по известным формулам сопряженных глубин. Как видно из рисунка, полученные нами экспериментальные результаты при различных значениях степени сужения ( $\varepsilon=b/B$ ) удовлетворительно совпадают с теоретической кривой Г.К. Илчева [2, 4, 5] (кривая 1) [1-4]. На этом же рисунке представлены теоретические кривые, полученные по формулам А.И. Модзалевского [1-4] для прыжка волны при числе Фруда  $Fr_3 < 3$  и  $h_6/h_3 < 2$ :

$$\frac{h_6}{h_3} = 1,15\sqrt{Fr_3} - 0,15 \quad (\text{кривая 2}). \quad (2)$$

Как видно из графика, эти кривые при  $Fr_3 < 3$  практически дают одинаковые результаты, а при

$Fr_3 > 3$  кривая 2, полученная по формуле (2), отрывается от линии 1. В результате этого совершенный гидравлический прыжок при  $Fr_3 < 3$  переходит к волнистому прыжку.

Инженер В.А. Саркисян на основании своих экспериментов установил предельное значение числа Фруда, при котором прыжок волны переходит к совершенному гидравлическому прыжку, и это предельное значение оказалось равно  $Fr_{пр.} = 2,25$ , а при этом соотношении сопряженные глубины составляли  $h_6/h_3 = 1,64$ . Как видно из рис. 1, этот факт подтвердился и в наших экспериментальных исследованиях. На точке пересечения  $h_6/h_3 = 1,64$  и  $Fr_3 = 2,25$  экспериментальные точки начали отрываться от кривой (2), полученной для прыжка волны.

Определение длины гидравлического прыжка производилось по измеренным значениям сопряженных глубин. Как отмечалось выше, существуют

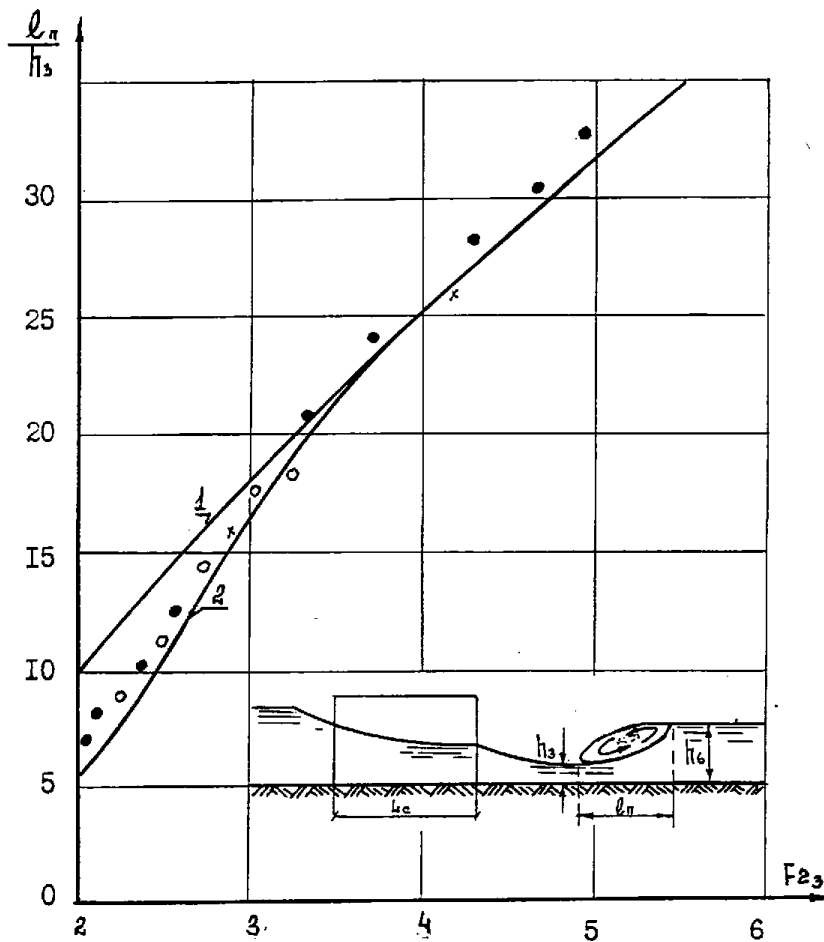


Рис. 2. Влияние числа Фруда ( $Fr_3$ ) на относительную длину гидравлического прыжка:

1 – по формуле Н.Д. Чертоусова (4); 2 – по формуле О.М. Айвазяна (3);

•, ○, × – экспериментальные точки автора соответственно при  $\varepsilon = 0,27; 0,53; 0,77$



Рис. 3. Образование гидравлического прыжка в реальных условиях:  
а - выход бурного потока из узкого канала в широкий; б - течение бурного потока в открытом канале;  
в, г - образование гидравлического прыжка

$Fr_3 > 3$  кривая 2, полученная по формуле (2), отрывается от линии 1. В результате этого совершенный гидравлический прыжок при  $Fr_3 < 3$  переходит к волнистому прыжку.

Инженер В.А. Саркисян на основании своих экспериментов установил предельное значение числа Фруда, при котором прыжок волны переходит к совершенному гидравлическому прыжку, и это предельное значение оказалось равно  $Fr_{пр.} = 2,25$ , а при этом соотношении сопряженные глубины составляли  $h_6/h_3 = 1,64$ . Как видно из рис. 1, этот факт подтвердился и в наших экспериментальных исследованиях. На точке пересечения  $h_6/h_3 = 1,64$  и  $Fr_3 = 2,25$  экспериментальные точки начали отрываться от кривой (2), полученной для прыжка волны.

Определение длины гидравлического прыжка производилось по измеренным значениям сопряженных глубин. Как отмечалось выше, существуют различные формулы определения длины гидравлического прыжка в зависимости от значения числа Фруда втекающего потока ( $Fr_3$ ). В нашем случае мы оценили длину прыжка по формуле, полученной О.М. Айвазяном, который дает результаты при числе Фруда меньше 5. Эту формулу можно представить в виде

$$\ell_n / h_3 = k \frac{(h_6 - h_3)^3}{4h_3^2 h_6}, \quad (3)$$

$$\text{где } k = \frac{8(10 + \sqrt{Fr_3})}{Fr_3}.$$

На рис. 2 представлена зависимость в виде  $\ell_n / h_3 = f(Fr_3)$ , и сравниваются полученные экспериментальные результаты с расчетами О.М. Айвазяна и Н.Д. Чертоусова. При значении  $Fr_3 > 3,5$  формулы О.М. Айвазяна (3) и Н.Д. Чертоусова

$$\ell_n / h_3 = 10,3(\sqrt{Fr_3} - 1)^{0,81} \quad (4)$$

дают одинаковые результаты.

Полученные результаты, представленные на рис. 1, 2, дают возможность совместно решить формулу (3) и предельное значение сопряженных глубин  $(h_6/h_3)_{пр.} = 1,64$ , при котором происходит переход совершенного гидравлического прыжка к волнистому прыжку. Эти выражения можно представить в виде

$$\ell_n / h_3 = k \frac{(h_6 - h_3)^3}{4h_3^2 h_6}; \quad (5)$$

$$h_6 / h_3 = 1,64. \quad (6)$$

Совместное решение системы (5), (6) дает предельное значение длины гидравлического прыжка при переходе совершенного прыжка к волнистому прыжку. Это значение составляет  $(\ell_n / h_3)_{пр.} = 7,5$ .

Таким образом, результаты проведенных экспериментов, хорошо согласующихся с аналитическим решением, позволяют установить зависимости длины гидравлического прыжка от кинетичности потока за сужением и определить предельную длину гидравлического прыжка при переходе к волнистому прыжку, необходимую при расчетах крепления нижнего бьефа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков, В.А. Справочник по гидравлике [Текст] / В.А. Большаков, Ю.М. Константинов и др. - Киев: Вища шк., 1977.
2. Киселев, П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / П.Г. Киселев; под ред. П.Г. Киселева. - М., 1872.
3. Сайриджинов, С.Ш. Прохождение длинных волн через разные формы сжатия в открытых руслах: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / С.Ш. Сайриджинов. - М., 1991. - 150 с.
4. Сайриджинов, С.Ш. Методы определения вероятного размыва за преградами в водоотводящем канале [Текст] / С.Ш. Сайриджинов // ВНИИИТПИ Госстроя России. Серия «Строительство и архитектура»: экспресс-информация (зарубежный и отечественный опыт). - Вып. 3. - М., 2004.
5. Сайриджинов, С.Ш. Нестационарные течения в открытых руслах с водосливными преградами [Текст] / С.Ш. Сайриджинов // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». - М., 2011. - №2. - С. 62-66.

© Сайриджинов С.Ш., 2013