

УДК 532.1:532.2:626.882.628.14

С.Ш. САЙРИДИНОВ**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПРЕРЫВНОГО ВОЛНОВОГО ПОТОКА
В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ С МЕСТНЫМИ БОКОВЫМИ ПРЕГРАДАМИ**

CONTINUOUS WAVE FLOW COURSE ANALYSIS IN THE OPEN CHANNELS WITH LOCAL SIDE BARRIERS

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие давать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров волн при взаимодействии с местным боковым стеснением русла и совершенствовать методику расчета и проектирования объектов гидротехники, водоснабжения и водоотведения.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, гидравлический прыжок, прерывная волна, волновой поток, боковое сужение русла, водослив.

В гидротехническом строительстве часто встречаются сооружения, которые становятся причиной стеснения русла: мостовые переходы, берегозащитные дамбы, перемычки в процессе строительства плотины и т.п. [1, 5]. Эти сооружения подвергаются взаимодействию с волной прорыва и имеют ряд особенностей по сравнению с другими гидротехническими сооружениями, существенно усложняющими расчеты.

Стеснение речного потока сооружениями представляет местное сопротивление. Оно вызывает увеличение отметок свободной поверхности – подпор перед сооружением, который имеет важное практическое значение для установления отметок насыпей каналов, струнаправляющих дамб, траверсов, проектирования укреплений этих сооружений, прогнозирования возможного затопления земель и прибрежных населенных пунктов.

Потоки, пропускаемые через отверстия мостов, расположенных в нижних бьефах плотин, являются неустановившимися, т.е. волнами наполнения и отлива. При разрушении водонапорного сооружения отверстие моста будет работать на пропуск резко нестационарного потока – волны прорыва. Сжатие потока через пропускаемое отверстие моста и последующее его расширение является сложным процессом, и для того чтобы представить физику процесса и выявить основные его закономерности, принимаются следующие упрощения и допущения:

The article presents the results of theoretical and experimental research which allows to give engineering-based recommendations about determination of wave characteristics in interaction with local side 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, hydraulic jump wave, interrupted wave, wave flow, side riverbed narrowing, spill weir.

русло реки и канала принимается прямолинейным с постоянной шириной; рельеф дна русла принимается плоским; после взаимодействия волны, когда формируется отраженная волна, значение расхода считают неизменным во времени, т.е. процесс считается квазиустановившимся. Экспериментальная часть работы была выполнена в лаборатории газогидравлической аналогии кафедры гидравлики (МИСИ–МГСУ) на гидравлическом лотке, имеющем длину 90 м (рис. 1)^{1,2,3}.

В процессе эксперимента использовались волнопродукторы, с помощью которых были получены прерывные и гладкие волны. Прерывные волны были получены путем быстрого открытия затвора (рис. 2). 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

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 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.

³ 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. Пенза: МНИЦ, 2005. С. 207-211.

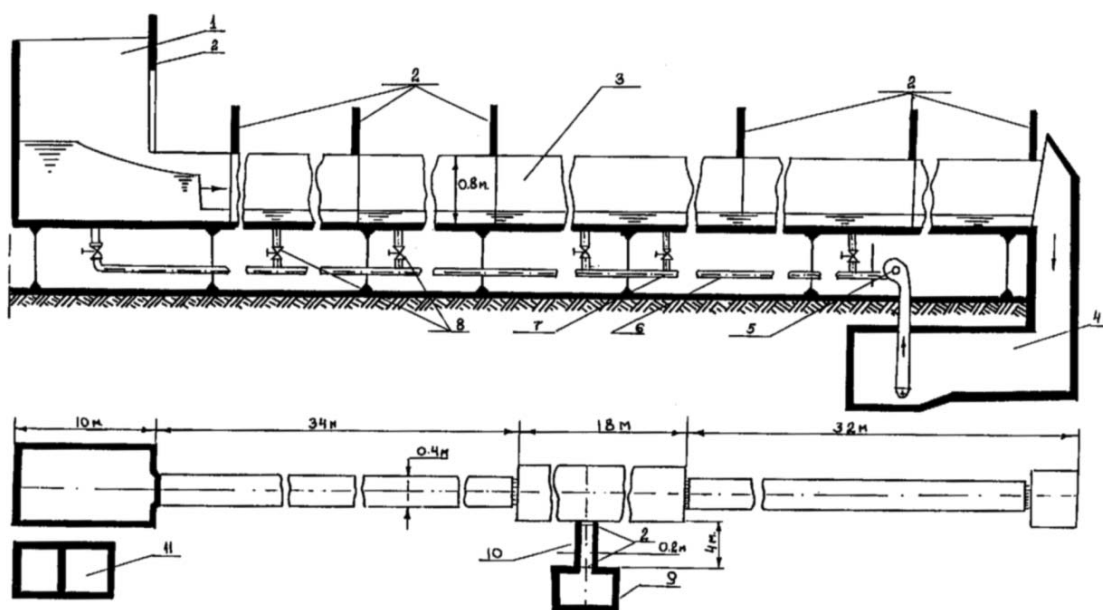


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – напорный бак объемом 35 м³; 2 – устройство для формирования длинных волн (затворы) в количестве 9 шт.;
- 3 – основной стеклянный лоток длиной 74 м с изменением ширины от 0,4 до 1,6 м;
- 4 – нижний приемный бак объемом 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 объемом 4 м³; 10 – малый стеклянный лоток длиной 4,5 м, шириной 0,2 м и глубиной 0,8; 11 – пульт управления стендом с автоматизированной записью измеряемых параметров

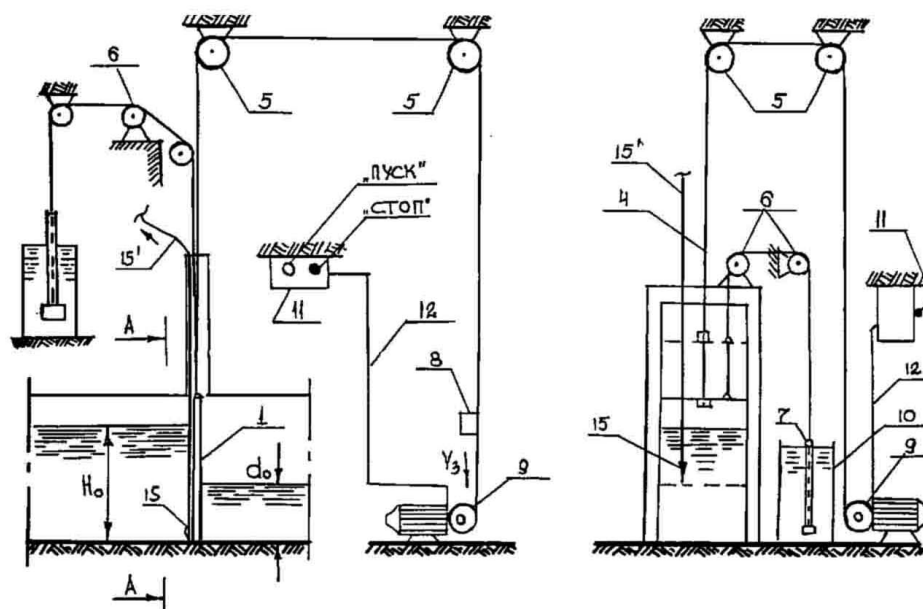


Рис. 2. Схема электрического гидрозатвора:

- 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 (данные обозначения также действительны для рис. 3 и 4)

подъема затвора до выхода из потока воды и сам процесс 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):

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

Интенсивность прерывной волны в опытах изменялась в следующем интервале:

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

где h_1 – глубина исходной волны;

d_0 – глубина воды в лотке;

h_0 – высота исходной волны.

Условие (2) позволяло получать на установке прерывные волны, длина которых превышала протяженность нижней части лотка (рис.4,а). В опытах

значение числа Фруда $\left(Fr = \frac{C_1}{\sqrt{gd_0}} \right)$ подходящей волны изменялось в диапазоне

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

Взаимодействие подходящей волны (C_1) с боковыми стенками местных преград приводит к образованию отраженной (C_2) и прошедшей (C_6) волн. Отверстие сооружения будет обтекаться потоком воды, движущимся за фронтом отраженной волны. При этом местное боковое сужение является водосливом с широким порогом при боковом сжатии с нулевой высотой порога, за которым сначала образуется обращенный бор, а затем отогнанный гидравлический прыжок. Полученная нами экспериментальным путем картина взаимодействия прерывной волны с местным боковым сужением представлена на рис. 4 и является основанием (расчетной схемой) для выполнения наших аналитических решений.

$$m_{сж} = f(\varepsilon, Fr, Re, S), \quad (4)$$

где $\varepsilon = b/B$ – степень сужения; b – ширина местного сужения; B – ширина канала; S – форма поперечного сечения сужения; Fr – критерий Фруда; Re – критерий Рейнольдса.

Данные о зависимости $m_{сж}$ от указанных факторов в справочной литературе в большинстве случаев отсутствуют. Величину m для решений систем алгебраических нелинейных замкнутых уравнений можем выбрать по данным работы [2], в которой коэффициент расхода получен для стационарного движения жидкости. С другой стороны, эти уравнения не учитывают потери энергии в момент соударения жидкости со стенкой. Учитывая вышесказанное, перед нами ставилась цель – экспериментально определить высоту прошедшей волны через местные сужения, так как влияние сжатия на поток зависит главным образом от геометрии твердых границ расхода и состояния потока. Явление сжатия настолько сложно, что получающийся вид движения нелегко подвергнуть какому-либо аналитическому решению, чтобы там не существовал какой-нибудь экспериментальный коэффициент или какое-нибудь допущение.

В нашей работе эксперименты проводились с двусторонним (симметричным) сужением при изменении степени сужения в пределах $0 \leq \frac{b}{B} \leq 1$. При каждой степени стеснения русла интенсивность исходной волны $((h_1 - d_0)/d_0)$ изменялась от 0,5 до 4 при постоянной первоначальной глубине воды. Глубина в верхнем бьефе увеличивалась одинаково на $\Delta H_0 = 5$ см, чтобы интенсивность волны росла плавно. При одной и той же первоначальной глубине проводилось от 5 до 10 экспериментов. В итоге для каждой степени сужения проводилось от 40-50 экспериментов. Изменялись высота и скорость волны во всех характерных шести сечениях (см. рис. 4). Выбранные расчетные сечения являются характерными створами для установления гидравлического режима данного сооружения и разработки аналитических решений. Обработка экспериментальных результатов позволяла получить график зависимости

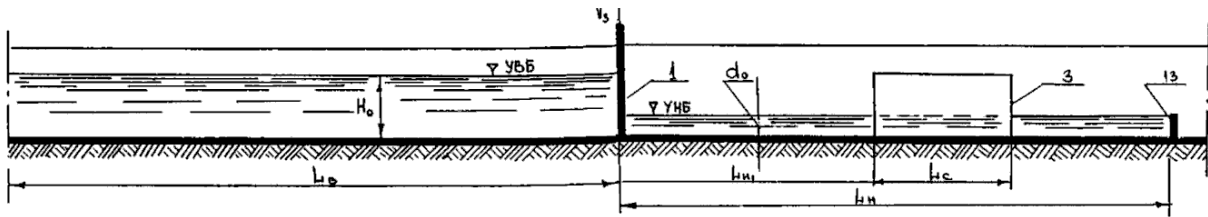


Рис. 3. Соотношения глубин верхней и нижней части гидролотка

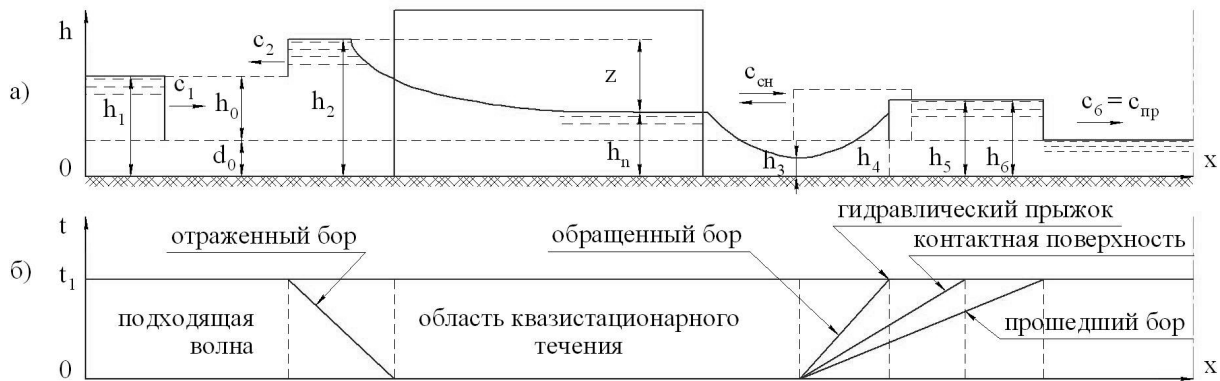


Рис. 4. Расчетная схема течения:
а - распределение глубин (для t_1); б - волновая диаграмма ($t - x$)

$$\frac{h_{np.} - d_0}{d_0} = A \left(\frac{h_1 - d_0}{d_0} \right), \quad (5)$$

где A – эмпирический коэффициент, зависящий от значения (ε); $h_{np.}$ – глубина прошедшей волны; h_1 – глубина исходной волны; d_0 – глубина спокойной воды в канале.

Зависимость (5) дает возможность достаточно просто определить высоту прошедшей волны по значениям (ε, d_0, h_1).

Для установления связи между отраженной и исходной волнами была получена зависимость вида

$$\frac{h_2 - d_0}{d_0} = f \left(\frac{h_1 - d_0}{d_0} \right).$$

Автор [3] в результате обработки своих экспериментальных данных по отражению волны от бокового местного сужения получил эмпирическую формулу, которая дает аппроксимации экспериментальных данных в виде

$$\frac{h_2 - d_0}{d_0} = A \left(\frac{h_0 + d_0}{d_0} - \sqrt{\frac{h_0 + d_0}{d_0}} \right), \quad (6)$$

где A – эмпирический коэффициент, который зависит от значения ε и определяется по формуле

$$A = 1,9 \varepsilon + 2,1. \quad (7)$$

Полученные нами экспериментальные данные также хорошо аппроксимируются кривыми, полученными по зависимости (6) для отраженной волны. Хорошее совпадение результатов дает возможность оценить корректность измерения высоты волны при отражении от местного бокового сужения при различных значениях ε .

Используя физическую картину взаимодействия волнового потока с местным боковым сужением, которую мы получили экспериментальным путем (см. рис.4) предполагаем, что поток вблизи сооружения носит квазистационарный характер, т.е. при достаточно большой длине волны (при $l > (2-3)h$ – т.е. при длине волны, превышающей 2/3 высоты волны), в зоне обтекания установление параметров потока происходит быстрее, чем изменение параметров в волне, и, начиная с некоторого момента времени, поток рассматривается стационарным.

При таком основном допущении становится возможным применить стационарные законы сохранения массы и энергии к характерным сечениям потока. Учитывая сложность процесса, а также зависимость параметров потока от различных факторов, принимаются следующие упрощения и допущения: первоначальная глубина (d_0) остается постоянной; потерями на некоторых участках потока пренебрегаем; истинный закон распределения скоростей по глубине в характерных сечениях заменяется осредненным; закон изменения давления по глубине принимается гидростатическим.

В работе [4] для прерывной волны, движущейся с фронтом, в системе координат написаны законы сохранения массы и количества движения в виде

$$h_1(c_1 - u_1) = d_0 c_1; \quad (8)$$

$$h_1[(c_1 - u_1)^2 + 0,5gh_1] = d_0(c_1^2 + 0,5gd_0), \quad (9)$$

где u_1, h_1 – скорость и глубина за фронтом волны;

g – ускорение силы тяжести.

Для каждого расчетного сечения (см. рис. 4) мы можем записать алгебраические уравнения, выражающие законы сохранения массы и энергии и известные прыжковые соотношения, вытекающие из закона сохранения количества движения.

Совместное решение уравнений (8) и (9) дают параметры исходной волны, которые описываются уравнениями

$$c_1 = \sqrt{g \frac{h_1(h_1 + d_0)}{2d_0}}; \quad u_1 = h_0 \sqrt{g \frac{h_1 + d_0}{2dh_1}}. \quad (10)$$

Соотношения между параметрами подходящей и отраженной волн можно получить из законов сохранения массы и количества движения в системе координат, связанной с фронтом отраженной волны:

$$c_2 = \sqrt{g \frac{h_2(h_1 + h_2)}{2h_1}} - u_1;$$

$$u_2 = u_1 - [(h_2 - d_0) - (h_1 - d_0)] \sqrt{g \frac{h_1 + h_2}{2h_1 h_2}}. \quad (11)$$

В случае отражения прерывной волны от местного бокового сужения воспользуемся формулой, полученной автором [4] в виде

$$\frac{h_2 - d_0}{d_0} = (1,9\varepsilon + 2,1) \left(\frac{h_0 + d_0}{d_0} - \sqrt{\frac{h_0 + d_0}{d_0}} \right), \quad (12)$$

где $\varepsilon = b/B$.

Решая совместно уравнения (11) и (12), получим соотношения между параметрами исходной волны и отраженной от местного бокового сужения в виде

$$c_2 = \sqrt{g \frac{h_2'(h_1 + h_2')}{2h_1}} - u_1; \quad (13)$$

$$u_2 = u_1 - (h_2' - h_1) \sqrt{g \frac{h_1 + h_2'}{2h_1 h_2'}}, \quad (14)$$

$$\text{где } h_2' = A \left(h_1 - d_0 \sqrt{\frac{h_1}{d_0}} \right) + d_0; \quad A = 1,9 \varepsilon + 2,1.$$

После образования отраженной волны местное боковое сужение работает как водослив с широким порогом при боковом сжатии с нулевой высотой порога. Для этого запишем уравнение расхода в форме, принятой для водослива с широким порогом:

$$q = u_2 h_2 = m \sqrt{2g} Z_0^{3/2}, \quad (15)$$

$$\text{где } Z_0 = h_2 + \frac{u_2^2}{2g} - h_n;$$

m – коэффициент расхода, учитывающий конкретные особенности течения;

h_n – глубина потока на пороге водослива.

Данное уравнение позволяет определить глубину потока на пороге водослива. На участке между сечениями «2» и «3» (см. рис. 4) должны выполняться законы сохранения массы и энергии:

$$u_2 h_2 = u_3 h_3; \quad (16)$$

$$h_2 + \frac{u_2^2}{2g} = h_3 + \frac{u_3^2}{2g} + \rho \frac{u_3^2}{2g}, \quad (17)$$

где ρ – коэффициент потерь на участке между сечениями «2» и «3». В начальный период течения в сечении «3» образуется прерывная волна, распространяющаяся к сооружению и сносящаяся потоком в противоположном направлении (обращенный бор), поэтому

$$h_3 = h_4; \quad u_3 = u_4. \quad (18)$$

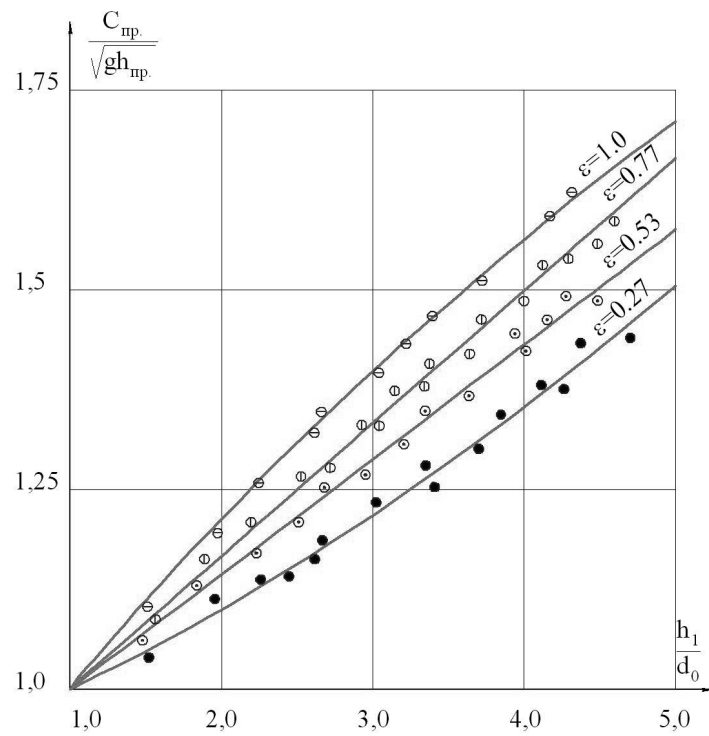


Рис. 5. Зависимость скорости фронта прошедшей прерывной волны от интенсивности подходящей при различных степенях сужения ($\epsilon = b/B$)
 (•, ◦, ⊙, ⊖) – экспериментальные точки соответственно при $\epsilon = 0,27; 0,53; 0,77; 1,0$
 (—) – расчет по формуле (24)

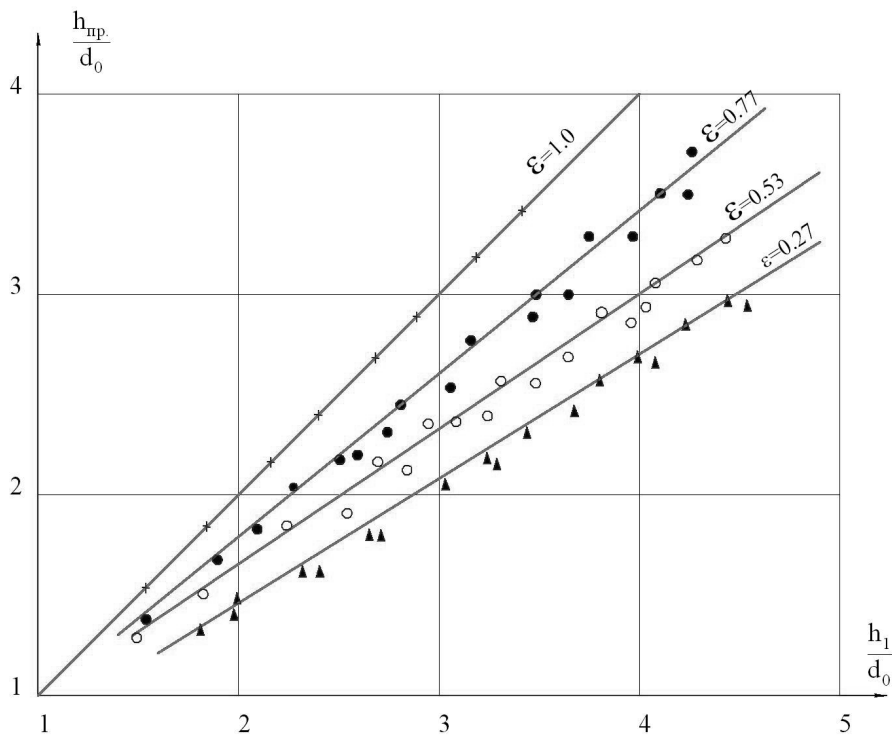


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными
 (•, ◦, ▲) – экспериментальные точки автора соответственно при $\epsilon = 0,77; 0,53; 0,27$.
 (—) – теоретический расчет по формулам (23), (24)

Параметры в сечениях «3» и «5» будут связаны соотношением в обращенном боре, которое легко получить аналогично (13) и (14):

$$c_{сн} = \sqrt{g \frac{h_4(h_5 + h_4)}{2d_0}} - u_4, \quad (19)$$

$$u_5 = u_4 - \sqrt{g \frac{(h_5^2 - h_4^2)(h_5 - h_4)}{2h_5h_4}}. \quad (20)$$

Скорость фронта обращенного бора относительно потока меньше скорости течения в сечении «3», поэтому фронт сносится по течению. При сносе обращенного бора за счет действия сил трения скорость потока уменьшается и глубина перед фронтом возрастает. На некотором расстоянии от стенки обращенный бор останавливается и превращается в стационарную прерывную волну (отогнанный гидравлический прыжок). Для этого момента времени можно записать (для сечений «3» и «4») закон сохранения массы:

$$u_3h_3 = u_4h_4. \quad (21)$$

Для сечений «4» и «5» запишем уравнение неразрывности и соотношение в стационарном гидравлическом прыжке:

$$u_4h_4 = u_5h_5; \quad u_5 = \sqrt{g \frac{h_4(h_5 + h_4)}{2h_5}}. \quad (22)$$

Контактная поверхность (см. рис. 4) к моменту времени (t_1) разделяет между собой находящуюся в нижнем бьефе воду от воды, поступающей из верхнего бьефа. Очевидно, что на контактной поверхности должны выполняться соотношения:

$$u_5 = u_6; \quad h_5 = h_6. \quad (23)$$

Параметры в прошедшей прерывной волне получим решая, совместно выражения (9) и (10) относительно c_{np} и u_{np} :

$$c_6 = c_{np} = \sqrt{g \frac{h_6(h_6 + d_0)}{2d_0}}; \quad (24)$$

$$u_6 = u_{np} = (h_6 - d_0) \sqrt{g \frac{h_6 - d_0}{2d_0h_6}}.$$

Полученная система уравнений является замкнутой, позволяет определить глубины и скорости в

характерных сечениях волны при известных значениях глубины воды в канале (d_0), величины сужения (ε) и коэффициентов m , ρ .

Система уравнений справедлива для схемы течения, представленной на рис. 4, однако в зависимости от соотношения параметров исходной волны h_1/d_0 и b/B в зоне растекания потока возможны различные режимы течения, каждый из которых имеет свои особенности. Снижение скорости течения (торможение) в сверхкритическом потоке возможно только при образовании скачка, где функция претерпевает разрыв, и поэтому в нижнем бьефе образуется еще одна волна – гидравлический прыжок наряду с прошедшей волной. Гидравлический прыжок в области квазистационарного расширения при критическом течении в створе сужения (режим 2) образуется, когда фронт обращенного бора останавливается вследствие увеличения глубины за его фронтом. При достаточно большой степени расширения потока в нижнем бьефе, глубина потока в конце квазистационарной зоны (h_4) становится настолько малой, что скорость фронта обращенного бора ($c_{сн}$) становится больше, чем скорость потока (u_4), и обращенный бор движется вверх по потоку и проникает внутрь квазистационарной зоны расширения, в некотором сечении обращенный бор останавливается и превращается в отогнанный гидравлический прыжок. За гидравлическим прыжком поток становится докритическим (режим 3), поэтому при увеличении его живого сечения произойдет дальнейшее увеличение глубины h_3 до h_5 .

При малой интенсивности исходной волны снижение глубины и увеличение скорости течения в створе сужения происходит в пределах докритического режима (режим 4), поэтому режим течения потока в нижнем бьефе также остается докритическим.

Сопоставление результатов расчета и экспериментов проводилось во всем исследованном диапазоне изменения исходных параметров:

$$1,5 \leq \frac{h_1}{d_0} \leq 4,5; \quad 1,25 \leq \frac{C_1}{\sqrt{gd_0}} \leq 3,5,$$

где h_1 – глубина исходной волны, $h_1 = h_0 + d_0$;

h_0 – высота исходной волны;

d_0 – глубина спокойного потока;

C_1 – скорость фронта исходной волны.

В результате обработки полученных экспериментальных данных нами выявлены закономерности распространения скоростей подходящей, отраженной и прошедшей волн, а также характерные глубины потока. С ростом интенсивности исходной волны происходит увеличение скорости фронта исходной и прошедшей волн, и чем больше сужается створ, тем меньше скорость фронта прошедшей волны (рис. 5).

С ростом интенсивности исходной волны произошло увеличение глубин за фронтом прошедшей волны. Как видно из графика (рис.6), полученные нами экспериментальные кривые удовлетворительно согласуются с результатами аналитических решений во всем диапазоне изменения интенсивности подходящей волны. Незначительное завышение аналитических результатов можно объяснить тем, что при выполнении аналитических расчетов нами был сделан ряд допущений, в том числе не учитывались потери энергии на участке сужения, и, кроме того, в этих уравнениях не учитываются потери энергии, а с другой стороны - в уравнениях присутствует коэффициент расхода (m), для которого в настоящее время нет аналитического решения.

Таким образом, экспериментально полученная физическая картина взаимодействия длины волны с местным боковым сужением русла (случай водослива с широким порогом при нулевой высоте порога) позволяла произвести теоретический и экспериментальный анализ процесса взаимодействия движущегося волнового потока с указанной преградой, при-

менить стационарные законы сохранения массы и энергии к характерному сечению потока и тем самым определить глубины и скорости в характерных сечениях волны при известных значениях глубины воды в канале (d_0), величины сужения и коэффициентов m и ζ . Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют давать инженерно обоснованные рекомендации по определению параметров волн при взаимодействии с местным боковым стеснением русла и совершенствовать методику проектирования гидротехнических объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов. М., 1969. 463 с.
2. Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. М., 1987. 430 с. Ч. 2.
3. Саркисян В.А. Особенности отражения длинных волн от преград в открытых потоках: дис. ... к.т.н. М., 1988. 146 с.
4. Мишуев А.В. О волновых процессах в каналах при быстром образовании отверстий в водоперегораживающем сооружении // Гидравлика. Вып. 1. М.: Высшая шк., 1977. С. 68-78.
5. Мишуев А.В., Приказчиков Н.А., Сладкевич М.С. Исследование воздействия длинных волн на огражденные сооружения и берега // Методы исследования и расчетов волновых воздействий на гидротехнические сооружения и берега. Л.: Энергоиздат, 1982. С. 190-191.
6. Сайриддинов С.Ш. Нестационарные течения в открытых руслах с водосливными преградами // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». М., 1969. 463 с.

© Сайриддинов С.Ш., 2014

Об авторе:

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

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

Для цитирования: 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. 63-70.