

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ С ВОДОСЛИВНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

С.Ш. Сайридинов

Тольяттинский государственный университет
ул. Белорусская, 14, Тольятти, Россия, 445667

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. Эти сооружения могут подвергаться взаимодействию с волной прорыва и имеют ряд особенностей по сравнению с другими гидротехническими сооружениями, существенно усложняющих расчеты. Стеснение речного потока сооружениями представляет местное сопротивление. Оно вызывает увеличение отметок свободной поверхности — подпор перед сооружением, который имеет важное практическое значение для назначения отметок насыпей каналов, струенаправляющих 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 физическую сторону процесса и выявить основные его закономерности, установим следующие упрощения и допущения: русло реки и канала принимается прямолинейным с постоянной шириной; рельеф дна русла — плоским; после взаимодействия волны, когда формируется отраженная волна, значение расхода считают неизменным во времени, т.е. процесс считается квазиустановившимся (рис. 1).

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. Такую

физическую картину взаимодействия прерывной волны с местным боковым сужением (рис. 1) мы получили экспериментальным путем, и это позволяет уточнить режимы течения потока в зоне растекания и применять системы замкнутых алгебраических уравнений, в которые входит коэффициент расхода водослива с боковым сжатием $m_{сж}$.

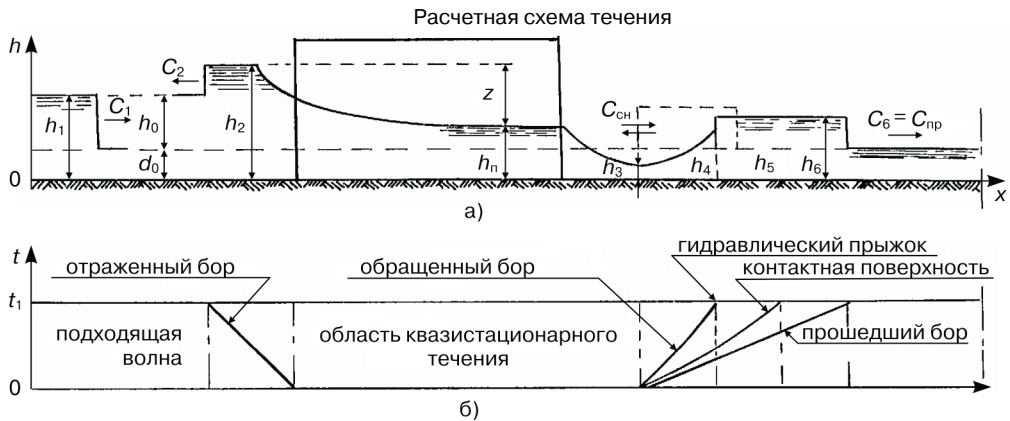


Рис. 1. Схема взаимодействия прерывной волны с местным боковым сужением: а) распределение глубин (для t_1); б) волновая диаграмма ($t - x$)

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. Измерялись высота и скорость волны во всех интересующих нас сечениях. Экспериментальные данные по прошедшей волне аппроксимировались кривой вида

$$\frac{h_{пр} - d_0}{d_0} = A \left(\frac{h_1 - d_0}{d_0} \right), \quad (1)$$

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

Зависимость (1) 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

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

В результате обработки экспериментальных данных по отражению волны от бокового местного сужения [6] была получена эмпирическая формула, которая дает аппроксимации экспериментальных данных в виде

$$\frac{h_2 - d_0}{d_0} = A \left(\frac{h_0 + d_0}{d_0} - \sqrt{\frac{h_0 + d_0}{d_0}} \right), \quad (2)$$

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

$$A = 1,9 \varepsilon + 2,1. \quad (3)$$

Полученные нами экспериментальные данные также хорошо аппроксимируются кривыми, полученными по зависимости (2) для отраженной волны. Хорошее совпадение результатов дает возможность оценить корректность измерения высоты волны при отражении от местного бокового сужения при различных значениях ε .

Теоретический анализ процесса взаимодействия с местным боковым сужением можно основывать на известных теоретических решениях, которые использовались ранее при решении задач о прохождении длинных волн в зонах резкого изменения сечения канала и взаимодействии длинной волны с сужениями вида вертикальной стенки.

Используя физическую картину взаимодействия волнового потока с местным боковым сужением, которую мы получили экспериментальным путем (см. рис. 1) предполагаем, что поток вблизи сооружения носит квазистационарный характер, т.е. при достаточно большой длине волны в зоне обтекания установление параметров потока происходит быстрее, чем изменение параметров в волне, и начиная с некоторого момента времени поток рассматривается как стационарный.

При таком основном допущении становится возможным применить стационарные законы сохранения массы и энергии к характерным сечениям потока. С учетом сложности процесса, а также зависимости 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.

Для прерывной волны, движущейся с фронтом, в системе координат можно написать законы сохранения массы и количества движения в виде

$$h_1(c_1 - u_1) = d_0 c_1, \quad (4)$$

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

где u_1, h_1 — скорость и глубина за фронтом волны; g — ускорение силы тяжести.

Для каждого расчетного сечения (см. рис. 1) можно записать алгебраические уравнения, выражающие законы сохранения массы и энергии и известные прыжковые соотношения, вытекающие из закона сохранения количества движения.

Совместное решение (4) и (5) дают параметры исходной волны ($C_1; U_1$). Соотношения между параметрами подходящей и отраженной волн можно получить из законов сохранения массы и количества движения в системе координат, связанной с фронтом отраженной волны ($C_2; U_2$). В случае отражения прерывной волны от местного бокового сужения воспользуемся формулами (2) и (3).

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

$$q = U_2 h_2 = m_{\text{сж}} \sqrt{2g} Z_0^{3/2}, \quad (6)$$

где $Z_0 = h_2 + \frac{U_2^2}{2g} - h_n$; $m_{\text{сж}}$ — коэффициент расхода, учитывающий конкретные особенности течения.

Решая уравнение (6) относительно $m_{\text{сж}}$, получим

$$m_{\text{сж}} = \frac{U_2 h_2}{\sqrt{2g} (h_2 + \frac{U_2^2}{2g} - h_n)^{3/2}}, \quad (7)$$

где h_n — глубина потока на пороге водослива, которую можно определить по уравнению (6), принимая коэффициент расхода как для водослива с широким порогом по справочной литературе.

Коэффициент расхода водослива $m_{\text{сж}}$ с боковым сжатием, для которого нет строго математического решения, зависит от ряда факторов:

$$m_{\text{сж}} = f(\epsilon, Fr, Re, S), \quad (8)$$

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

Данные о зависимости $m_{\text{сж}}$ от указанных факторов в справочной литературе в большинстве случаев отсутствуют. Величина m для решений систем алгебраических нелинейных замкнутых уравнений в работе [5] выбрана по данным работы [8], в которой коэффициент расхода получен для стационарного движения жидкости. С другой стороны, эти уравнения не учитывают потери энергии в момент соударения жидкости со стенкой. Как отмечается в [6], экспериментальные результаты, по сравнению с аналитическими решениями, дают заниженные результаты. Учитывая сказанное, мы поставили 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.

Таким образом, экспериментально полученная физическая картина взаимодействия длиной волны с местным боковым сужением русла (случай водослива с широким порогом при нулевой высоте порога) позволяет произвести теоретиче-

ский и экспериментальный анализ процесса взаимодействия движущегося волнового потока с указанной преградой, применить стационарные законы сохранения массы и энергии к характерным сечением 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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Мишуев А.В.* О волновых процессах в каналах при быстром образовании отверстий в водоперегораживающем сооружении // Гидравлика: Сб. НМС по гидравлике. Вып. 1. — М.: Высшая школа, 1977.
- [2] *Мишуев А.В., Приказчиков Н.А., Сладкевич М.С.* Взаимодействие прерывных волн типа цунами с оградительными сооружениями // Процессы возбуждения и распространения цунами. — М., 1982.
- [3] *Мишуев А.В., Сладкевич М.С.* Исследование параметров прерывной волны в зонах резкого изменения ширины канала // Численные методы в гидравлике: Тезисы докладов. Всесоюзный симпозиум. — Телави, 1980.
- [4] *Мишуев А.В., Приказчиков Н.А., Сладкевич М.С.* Исследование воздействия длинных волн на оградительные сооружения и берега // Методы исследования и расчетов волновых воздействий на гидротехнические сооружения и берега. — Л.: Энергоиздат, 1982.
- [5] Разработать методику расчета воздействия волн цунами на портовые сооружения и акватории: Отчет МИСИ им. В.В. Куйбышева № 78009328. — М., 1980.
- [6] *Саркисян В.А.* Особенности отражения длинных волн от преград в открытых потоках: Дисс. ... канд. техн. наук. — М., 1988.
- [7] *Сайриддинов С.Ш.* Прохождение длинных волн через разные формы сжатия в открытых руслах: Дисс. канд. техн. наук. — М., 1991.
- [8] *Чоу В.Т.* Гидравлика открытых каналов. — М., 1969.

NON-STATIONARY CURRENTS IN RIVERBEDS WITH OVERFLOW BARRIERS

S. Sayriddinov

Togliatti State University
Belarus str., 14, Togliatti, Russia, 445667

The article presents the results of theoretical and experimental research which allow 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 buildings, hydraulic jump, interrupted wave, wave stream, lateral narrowing of river-bed, spillway.