

С. С. Лебедь

О ПОСТРОЕНИИ ПРОДОЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОТОКОВ НА ВОДОСЛИВАХ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Водосливы с широким порогом получили большое распространение в гидротехнике. По их типу работают подмостовые водопропускные отверстия, головные сооружения лесопропускных плотин, водолесопропускные отверстия низконапорных лесосплавных плотин и т. п. Во всех случаях построение продольного профиля потока на водосливе с широким порогом имеет важное значение для решения ряда практических задач.

Впервые задача о построении кривой свободной поверхности потока при неравномерном установившемся движении была поставлена и решена Буссинеском [1]. Однако предложенный им метод построения кривых свободной поверхности не подходит для количественного решения задач водослива, что и было отмечено позднее [2]. Задача построения кривой свободной поверхности деформированного потока, каким является поток, переливающийся через водослив, весьма сложна. Метод построения кривой свободной поверхности такого потока с учетом наклона и искривления струй был предложен В. В. Смысловым [2,3]. В. В. Смыслов дает способы построения кривой свободной поверхности деформированного потока для случая плоской и пространственной задач, свободного и затопленного истечения. Приведенные сравнения расчетной кривой с экспериментальной показывают хорошее совпадение.

Следует указать на метод учета влияния наклона и искривления струй при расчете кривой свободной поверхности, предложенный А. Кефегги и С. Хаммадом [4]. Он также дает хорошие результаты. Однако указанные методы весьма трудоемки.

Нами проведены экспериментальные исследования продольных профилей потоков, переливающихся через водосливы с широким порогом для условий, соответствующих работе низконапорных лесосплавных плотин. Опыты по исследованию водослива с широким порогом проводились в лотке прямоугольного сечения длиной 15 м, шириной 1,5 м, высотой остекленных стенок 0,6 м. Дно лотка горизонтальное, металлическое, гладкое. В лотке монтировались модели водосливов, выполненные из органического стекла. Было изготовлено несколько моделей (типов) водослива с широким порогом.

Модель № 1 водослива с широким порогом прямоугольной формы с острой входной кромкой и вертикальным низовым уступом. Ширина порога δ — 400 мм, ширина по водосливному фронту b — 1500 мм и высота заложения порога P — 120 мм (рис. 1, а).

Модель № 2 водослива таких же размеров, как и модель № 1, но имеет плавный вход в виде наклонной плоскости (понур) и такой же слив (рис. 1, б), где $\alpha_1 = 19^\circ 30'$ и $\alpha_2 = 8^\circ 30'$.

Модель № 3 водослива с широким порогом: $\delta=400$ мм, $b=1050$ мм и $P=0$ (рис. 1, а);
 Модель № 4 водослива: $\delta=400$ мм, $b=750$ мм и $P=0$ (рис. 1, в);
 Модель № 5 водослива с широким порогом: $\delta=400$ мм, $b=450$ мм и $P=0$ (рис. 1, в).

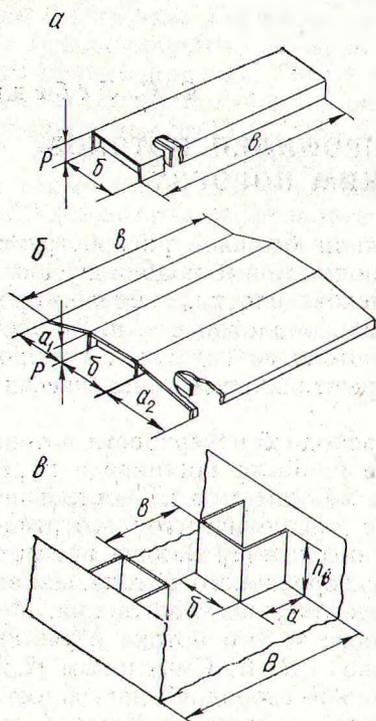


Рис. 1. Модели водосливов:
 а — с широким порогом; б — полигональный; в — с боковым сжатием.

Было выполнено более 30 опытов, которые по типу водослива можно разделить на 6 групп. Каждый опыт характеризуется следующими постоянными для него условиями: напором на пороге H и относительной шириной порога $\delta:H$; относительной высотой заложения порога $P:H$; условиями входа потока на водослив и слива (острая прямоугольная кромка входа и слива или плавный вход и слив); условиями протекания потока (подтопленный или неподтопленный водослив) и т. п.

Первая группа включает 6 опытов, которые проводились на модели № 1. Соответственно опытам условия их проведения следующие: напоры H 50, 80, 100, 120, 140, 160 мм или близкие к ним, таким образом, относительная ширина порога $\delta:H$ изменялась в широких пределах — $2,5 \div 8$; относительная высота заложения порога $P:H$ — $0,75 \div 2,4$. Во всех опытах первой группы подтопление со стороны нижнего бьефа отсутствовало. Посредством специальных стеклянных трубок обеспечивался доступ воздуха под сливающуюся с порога струю.

Вторая группа включает 5 опытов, которые проводились на той же модели водослива, но при условии частичного

подтопления его со стороны нижнего бьефа, т. е. обеспечивалось плавное сопряжение бьефов, характеризующееся поверхностным режимом и наличием на свободной поверхности пологой волны. Опыты проводились при напорах H 60, 80, 100, 120 и 150 мм.

Третья группа также состояла из 5 опытов, проведенных на модели № 2 (см. рис. 1, б). Напоры — 60, 80, 100, 120 и 150 мм. Цель проведения опытов этой группы — изучение влияния плавности входа и слива на продольный профиль потока.

Для выявления влияния степени бокового сжатия на продольный профиль потока проведены четвертая, пятая и шестая группы опытов (каждая из 5 опытов, характеризующихся напорами 60, 80, 100, 120 и 140 мм). Четвертая группа опытов проводилась на водосливе № 3 (см. рис. 1, в) со степенью бокового сжатия потока $b:B=0,7$, где B — ширина потока в верхнем бьефе в свободном состоянии. Пятая группа опытов выполнена на водосливе № 4 (см. рис. 1, в) со значением $b:B=0,5$. Шестая группа опытов выполнена на модели № 5 со значением $b:B=0,3$ (см. рис. 1, в).

Продольные профили снимались при проведении исследований всех указанных выше типов водослива во всех шести группах опытов.

При этом относительная ширина порога водослива изменялась в широких пределах (2,5÷8). Для каждого опыта получен продольный профиль. Далее ставилась задача получить упрощенные методы для построения продольных профилей по заданным условиям протекания потока.

Анализ полученных продольных профилей дает основание сделать следующие выводы.

Для профилей первой и третьей групп опытов, т. е. для водосливов № 1 и 2, характерно постепенное уменьшение глубин на водосливе вниз по течению при $\delta : H < 4$, что было отмечено также и другими исследователями [5]. При $\delta : H > 4$ по мере увеличения этого отношения растет протяженность участка потока с параллельно-струйным или близким к нему течением. Для этих же типов водосливов при $\delta : H > 7$ профиль потока на водосливе имеет форму так называемой стоячей волны, т. е. на входной части водослива имеется сжатое сечение — яма [6], за которой глубина потока увеличивается, а затем опять свободная поверхность уменьшается до самого конца порога. Это хорошо согласуется не только с нашими опытами, но и с экспериментальными данными А. Р. Березинского [7], полученными им на водосливах с шириной порога $\delta = 50$ см, высотой заложения порога $P = 10,7, 20,8$ и $40,0$ см.

Что касается водосливов типа 3 и 4, то свободная поверхность переливающихся через них потоков все время понижается вниз по течению. Для водослива типа 5 в наших опытах наблюдалось некоторое повышение глубин в самом конце водослива при относительно низких напорах ($\delta : H > 5-6$). Это объясняется наличием подпора (частичного подтопления) со стороны нижнего бьефа. Такова некоторая характеристика продольных профилей потоков на водосливах с широким порогом.

Хорошей иллюстрацией могут служить соответствующие продольные профили, построенные в безразмерном виде (рис. 2, прерывистые линии), при этом по вертикали откладывались значения относительных глубин $\delta : H$, а по горизонтали — величины относительных расстояний этих глубин от входа на водослив $\delta_x : \delta$. Здесь h_x — глубина вертикали, находящейся на расстоянии δ_x от входа на водослив; H и δ — соответственно напор на пороге водослива и ширина его. Такой выбор безразмерных координат ($h_x : H$ и $\delta_x : \delta$) для построения продольных профилей потоков, переливающихся через водослив с широким порогом, обоснован тем, что он соответствует законам подобия и тем самым дает возможность сопоставлять величины относительных глубин на сходственных вертикалях потоков однотипных водосливов. Такой подход общеизвестен и оправдан.

Выбранные безразмерные координаты удобны еще и тем, что облегчают решение обратной задачи, заключающейся в отыскании величин h_x (глубин вертикали) по заданным условиям протекания потока и его расходу Q . Действительно, зная Q, P, δ , ширину по фронту и форму порога водослива, по известным в гидравлике зависимостям и формулам легко найти соответствующий напор H на пороге этого водослива. Далее простым умножением соответствующей относительной глубины $h_x : H$ на найденный напор H получим глубину вертикали h_x . Так можно найти глубины всех интересующих вертикалей. Поэтому целесообразно было бы получить вместо нескольких безразмерных продольных профилей водосливов один общий (универсальный).

Для получения универсального продольного профиля по условиям первой группы опытов (водослив № 1, свободное истечение) нами до-

полнительно тщательно измерены эти профили с трехкратным фиксированием их при каждом напоре.

Рассмотрение продольных профилей в безразмерном виде (рис. 2, а), относящихся к первой группе опытов (водослив типа 1), показывает, что на передней грани водослива, где $\delta_x : \delta = 0$, значения относительных глубин $h_x : H$ для различных значений $\delta : H$ весьма близки между собой. Поэтому для вертикали у входа на водослив можно принять одно общее значение относительной глубины, найденное как

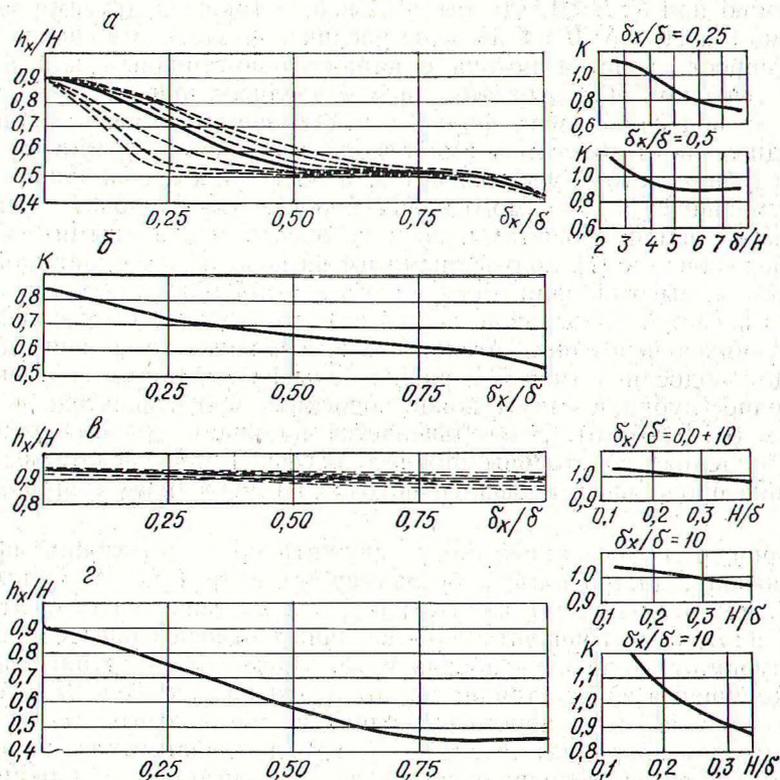


Рис. 2. Универсальные продольные профили:

а — водослив № 1; б — водослив № 2; в — водослив № 3; г — водослив № 5.

среднее арифметическое измеренных величин. О хорошем совпадении относительных глубин на вертикали над входным ребром свидетельствуют и результаты обработанных нами опытных данных А. Р. Березинского [7]. Далее на участке от $\delta_x : \delta = 0$ до 0,75 величины относительных глубин $h_x : H$ вертикалей, находящихся на одинаковом расстоянии от входа, существенно отличаются друг от друга при разных значениях $\delta : H$. Поэтому для построения единого (универсального) профиля на этом участке целесообразно в качестве основного принять безразмерный профиль, получаемый при $\delta : H = 4$. Такой выбор обоснован тем, что указанное значение величин $\delta : H$ критическое. Действительно, при $\delta : H < 4$ свободная поверхность потока на водосливе будет непрерывно понижаться, тогда как при $\delta : H > 4$ длина участка параллельно-струйного течения будет увеличиваться, и кривая свободной поверхности

приобретет описанную ранее форму. На рассматриваемом участке (от $\delta_x : \delta = 0$ до $0,75$) для перехода от профиля, соответствующего $\delta : H = 4$, к продольным профилям других значений $\delta : H$, необходимо ввести соответствующие поправочные коэффициенты. Для удобства пользования составлены графики, выражающие связь между поправочными коэффициентами K_i и относительной шириной порога $\delta : H$. Такие графики построены для вертикалей, находящихся на расстояниях $\delta_x : \delta = 0,25$ и $0,50$ от входа на порог водослива (см. рис. 2, а). Поправочный коэффициент K_i определялся как частное от деления относительной глубины ($h_x : H$) на вертикали с относительной шириной порога $(\delta : H)_i$ на относительную глубину ($h_x : H$) сходственной вертикали при величине $\delta : H = 4$. Таким образом,

$$K_i = \left(\frac{h_x}{H} \right)_i : \left(\frac{h_x}{H} \right)_4$$

Следовательно, для определения, например, относительной глубины вертикали, находящейся на расстоянии $\delta_x : \delta = 0,50$ от входа на порог, при заданном значении $\delta : H$ необходимо по универсальному профилю найти для сходственной вертикали значение $(h_x : H)_4$, затем умножить его на найденный по соответствующему графику поправочный коэффициент K (см. рис. 2, а) для заданного $\delta : H$. Полученное произведение даст искомую относительную глубину $h_x : H$. Умножая ее на H , найдем значение глубины вертикали h_x . Что касается значений относительной глубины вертикалей $h_x : H$ для участка от $\delta_x : \delta = 0,75$ до $\delta_x : \delta = 1,00$, то все они для сходственных вертикалей по величине очень близки между собой. А потому для этих вертикалей принимается одно значение, найденное как среднее арифметическое из имеющихся экспериментальных данных.

В соответствии с изложенной выше методикой на основании экспериментальных данных был построен универсальный продольный профиль потока на водосливе с широким порогом (см. рис. 2, а, сплошная линия). Графики к нему для определения поправочных коэффициентов K приведены на рис. 2, а. Предлагаемый метод построения продольных профилей может быть рекомендован для условий, аналогичных условиям опытов первой группы. Этот метод дает возможность определять глубины вертикалей с точностью до $\pm 1 \div 3\%$.

Вторая группа опытов отличается от первой условиями протекания потока через порог водослива. В отличие от первой во второй группе опытов имело место частичное подтопление со стороны нижнего бьефа. Ставилась цель получить плавное сопряжение потока на водосливе с потоком нижнего бьефа. Глубины на параллельно-струйном участке порога оставались такими же, как и в случае свободного истечения через водослив. Исключение составляли глубины на участке ниже сечения, соответствующего $\delta_x : \delta = 0,75$. На этом последнем участке во второй группе опытов устанавливалась глубина, на всем протяжении близкая по величине к глубине вертикали, отстоящей на расстоянии $\delta_x : \delta = 0,75$ от входа на порог водослива. Для участка, определяемого значениями $\delta_x : \delta$ от нуля до $0,75$, относительные глубины вертикалей очень близки к значениям глубин соответствующих вертикалей потока при свободном истечении. Следовательно, полученный для условий первой группы опытов универсальный продольный профиль может быть успешно принят и для условий второй группы опытов, с той лишь поправкой, что в последнем случае относительные глубины вертикалей

на участке ниже сечения $\delta_x : \delta = 0,75$ должны быть такие же, как и в этом сечении. Вид этого универсального профиля показан на рис. 2, а.

Универсальный профиль потока для условий третьей группы опытов (модель водослива 2) существенно отличается от полученных выше. Это объясняется условиями входа потока на порог водослива и слива с него. В этом случае остается различие в безразмерных профилях при $\delta : H < 4$ и $\delta : H > 4$. Однако это различие мало по сравнению с результатами предыдущих опытов. Поэтому универсальный профиль построен по среднеарифметическим значениям относительных глубин сходственных вертикалей. Наибольшие отклонения построенного универсального профиля от действительных не превышают $3 \div 5\%$. Универсальный продольный профиль потока на водосливе в безразмерном виде показан на рис. 2, а.

В четвертой группе опытов ввиду небольшой деформации потока, переливающегося через водо-лесопропускные отверстия ($b : B = 0,7$ и $P : H = 0$), глубины h_x на всем протяжении его больше критических. При совмещении продольных профилей в безразмерном виде линии свободных поверхностей на всем протяжении смещаются друг относительно друга по вертикали соответственно значениям $H : \delta$ (см. рис. 2, б, прерывистые линии). Однако смещение это незначительно. Нами найдены среднеарифметические значения координат $h_x : H$, по которым и построен универсальный продольный профиль потока (рис. 2, б, водослив 3, сплошная линия). Для перехода от универсального к продольным профилям различных значений $H : \delta$ получены поправочные коэффициенты

$$K_i = \frac{h_x}{H} : \left(\frac{h_x}{H} \right)_{\text{ср}}$$

Ввиду того что значения коэффициентов K_i для различных вертикалей ($\delta_x : \delta = 0,00; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00$) близки между собой при постоянном значении $H : \delta$, то нами найдены среднеарифметические значения $K_{i \text{ ср}}$ для $H : \delta = 0,125 \div 0,400$ ($\delta : H = 2,5 \div 8$) и построен график связи $K_{i \text{ ср}} = f(H : \delta)$ (рис. 2, б). Эта связь хорошо аппроксимируется линейной зависимостью вида

$$K_{i \text{ ср}} = b - a \frac{H}{\delta}$$

Способом наименьших квадратов найдены параметры $a = 0,16$ и $b = 1,04$. Аналитическая зависимость имеет вид

$$K_{i \text{ ср}} = 1,04 - 0,16 \frac{H}{\delta}$$

Пользуясь универсальным профилем и аналитической зависимостью или соответствующим ей графиком, можно построить продольный профиль для любого значения $H : \delta$ и найти распределение средней по вертикали скорости вдоль потока.

Водослив 4 ($b : B = 0,5$ и $P : H = 0$) по сравнению с водосливами 3 и 5 можно рассматривать как промежуточный переходный тип. При отсутствии подтопления со стороны нижнего бьефа его продольные профили близки соответствующим профилям водослива 5 (под соответствующими понимаем профили с одинаковыми значениями относи-

тельного напора $H : \delta$), а потому универсальный профиль последнего может быть использован в первом приближении для построения продольных профилей водослива 4. При истечении в условиях подтопления продольные профили следует строить рекомендованными в литературе способами.

Безразмерные продольные профили потоков на водосливе 5 ($b : B = 0,3$ и $P : H = 0$, шестая группа опытов) весьма и весьма хорошо совпадают для вертикалей, отстоящих от входа на водослив на расстояния $\delta_x : \delta = 0,00; 0,25; 0,50; 0,75$. На вертикали в конце водослива ($\delta_x : \delta = 1,00$) имеется значительный разброс точек. Универсальный профиль в этом случае построен по среднеарифметическим значениям величин $h_x : H$, найденным для рассматриваемых вертикалей (см. рис. 2, б). Для построения продольных профилей в обычных (размерных) координатах h_x, δ_x для вертикали в конце водослива ($\delta_x : \delta = 1,00$) приводится график связи между поправочным коэффициентом K_i и относительным напором на пороге водослива $H : \delta$ (см. рис. 2, б).

$$K_i = \left(\frac{h_x}{H} \right)_{\frac{\delta_x}{\delta} = 1} : \left(\frac{h_x}{H} \right)_{\frac{\delta_x}{\delta} = 1_{\text{ср.}}}$$

Имея в своем распоряжении универсальные продольные профили (модели профилей) потоков на водосливах с широким порогом указанных выше типов, мы можем для интересующих нас условий построить профиль в обычных координатах (размерных), что представляет определенный интерес для приложений [8].

Литература

- [1]. *I. Boussinesq*. Essai sur la theorie des laux courantes. Memoires presentes par divers savants a l' Akademie des Schences de l' institute de France, т. 23, 1877. [2]. *В. В. Смыслов*. Теория водослива с широким порогом. Киев, 1956. [3]. *В. В. Смыслов*. Исследования движения воды через водосливы с учетом кривизны и уклона свободной поверхности. «Изв. Ин-та гидрологии и гидротехники АН УССР», т. 6(XIII). Киев, 1950. [4]. *Khafadi, S. Hammad*. Velocity and Pressure Distribution in curved streamline flow Water Engineering March. 1954. [5]. *Г. И. Сухомел, И. Л. Розовский, В. В. Смыслов*. Движение воды через водослив с широким порогом. «Гидротехническое строительство», 1948, № 1. [6]. *Н. А. Григорович*. Анализ движения жидкости через водослив с широким порогом. «Гидротехник», 1931, № 1. [7]. *А. Р. Березинский*. Пропускная способность водослива с широким порогом. М., 1950. [8]. *С. С. Лебедь*. Исследование некоторых вопросов пропуска плотов плоской сплотки через отверстия низконапорных лесосплавных плотин. Канд. дисс. Минск, 1970.