

В результате проследенного анализа установлена графическая зависимость между средними коэффициентами расхода  $\mu$  и отношением длины  $l$  водосливной стенки к периметру  $P$  трубы водосброса (рис. 2). На графике экспериментальные точки для водосбросов из треугольных труб (1) и из полукруглых труб (2) образуют две кривые, полученные из опытов с тремя (кр. 1) и пятью (кр. 2) различными длинами стенок, устанавливаемых перед входом в трубчатый водосброс.

На рис. 3 изображены графики зависимости коэффициентов сопротивления  $\sum \xi - \xi_{дл}$ , полученных по формуле (2), от отношения  $l/P$ . Кривые 2 и 1 представляют зависимости  $\sum \xi - \xi_{дл} = f(l/P)$  соответственно для полукруглой и треугольной труб.

Принимая, что  $\sum \xi_{п} - \xi_{дл} = \xi_{ст} + \xi_{вх,п}$  для водосбросов из полукруглых труб и  $\sum \xi_{т} - \xi_{дл} = \xi_{ст} + \xi_{вх,т}$  - из треугольных, а также вычислив по формулам (1) и (2) значения  $\xi_{вх}$  для водосбросов из труб полукруглого (рис. 1, кр. 1) и треугольного сечений, которые соответственно равны 0,182 и 0,302, можно рассчитать значения  $\xi_{ст}$  для обоих водосбросов. Полученные таким образом коэффициенты сопротивления водосливной стенки для обоих типов водосбросов образуют одну общую кривую (см. рис. 3, кр. 3).

Следует отметить, что графики  $\mu = f(l/P)$  и  $\xi = f(l/P)$  построены по экспериментальным данным, полученным для двух типов водосбросов при отношении высоты водосливной стенки  $h_c$  к высоте труб  $a$ , равном 1,1.

### Л и т е р а т у р а

1. Розанов Н.П. О некоторых основных зависимостях для определения пропускной способности незатопленных трубчатых (туннельных) водопропускных сооружений. - Сб. тр. МИСИ. - М., 1961, № 32. 2. Справочник по гидротехнике. - М., 1955.

УДК 532.5:627.83

И.П.Вопнярский, канд. техн. наук (БПИ)

### К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СЖАТОЙ ГЛУБИНЫ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОСЛИВОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

При решении вопросов сопряжения бьефов гидротехнических сооружений первоочередной задачей является определение глубины в сжатом сечении потока, прошедшего через водослив, так называемой сжатой глубины  $h_c$ .

Как известно, сжатая глубина  $h_c$  подсчитывается исходя из уравнения Бернулли, написанного для сечения в верхнем бьефе водослива и сжатого сечения - в нижнем. Это уравнение относительно плоскости сравнения, совпадающей с горизонтальным дном в нижнем бьефе, для прямоугольного русла, т.е. в условиях плоской задачи, приводится к виду

$$q = \varphi h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)} \quad (1)$$

где  $q$  - удельный расход,  $m^2/c$ ;  $E_0$  - полная удельная энергия потока перед водосливом,  $m$ ;  $\varphi$  - коэффициент скорости, зависящий от сопротивлений движению потока между указанными двумя сечениями;  $g$  - ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ .

Имеющиеся в литературе аналитические и графические способы определения глубины  $h_c$  в основном направлены на облегчение решения уравнения (1), которое является кубическим относительно  $h_c$ . Проведенные автором сравнительные подсчеты для широкого диапазона  $E_0$  и  $q$  показали практически одинаковые значения глубины  $h_c$ , определенной по методам, в основе которых лежит расчетное уравнение (1).

Существенным моментом при расчете сжатой глубины  $h_c$  по уравнению (1) является предварительное назначение величины коэффициента скорости  $\varphi$ . Существующие в литературе рекомендации по этому вопросу малочисленны и довольно неопределенны. Так, по рекомендации Н.Н.Павловского [1], величина коэффициента  $\varphi$  для водосливов практического профиля с криволинейным очертанием сливной грани и гладкой поверхностью в зависимости от ее длины принимается в пределах  $1,00 \div 0,90$ . Несмотря на то что эти численные значения коэффициента  $\varphi$ , по мнению Н.Н.Павловского [1], представляют собой "лишь некоторую попытку подхода к этому вопросу", указанные рекомендации приводятся в учебной и справочной литературе, в том числе и изданной в последние годы [2, 3].

Невозможность в настоящее время теоретического обоснования величины коэффициента скорости  $\varphi$  при движении воды по поверхности водослива обуславливает его определение исходя из опытных или натуральных данных. Коэффициент  $\varphi$  возможно подсчитать из уравнения (1) при известных значениях  $q$ ,  $E_0$  и  $h_c$ .

Как показывает анализ результатов опытов Г.П.Скребкова [4, 5], Г.Х.Ибрагимовой [6] и других исследователей, а также опытов автора, коэффициент  $\varphi$  не является постоянной во-

личиной для данного водослива и с уменьшением напора  $H$  на водосливе (что сопровождается уменьшением протекающего расхода  $q$ ) уменьшается, Это возможно объяснить тем, что при уменьшении расхода и соответствующем уменьшении толщины струи увеличивается соотношение между толщиной турбулентного пограничного слоя и толщиной струи, в результате чего увеличивается сопротивление движению потока по водосливной поверхности [5] и уменьшаются значения коэффициента скорости  $\varphi$ . При этом для водосливов практического профиля возможны значения  $\varphi < 0,8$ , т.е. меньше рекомендуемых Н.Н.Павловским [1].

На основании многочисленных опытов, как собственных, так и целого ряда исследователей, Г.П.Скребков [5] рекомендует для определения коэффициента  $\varphi$  эмпирическую формулу

$$\varphi = 1 - 0,0155 \frac{P}{H}, \quad (2)$$

где  $P$  - высота водослива со стороны нижнего бьефа. Причем, как отмечает Г.П.Скребков [4], небольшие изменения шероховатости поверхности водослива и формы его оголовка (даже при изменении коэффициента расхода  $m$  на 10%) незначительно сказываются на величине коэффициента  $\varphi$ . Причем основным фактором, от которого зависит  $\varphi$ , является отнесенная величина напора на гребне водослива.

Г.Х.Ибрагимова [6] по результатам опытов с водосливами практического профиля при  $33,3 \geq P/H > 1,02$  для определения  $\varphi$  предлагает использовать формулу

$$\varphi = 0,985 \left( \frac{P}{H} \right)^{-0,116} \quad (3)$$

Следует отметить, что расхождение значений  $\varphi$ , подсчитанных по формулам (2) и (3), достигает 13,4% (при  $P/H = 6$ ). Это может привести к расхождениям при подсчете по уравнению (1) величины сжатой глубины порядка  $10 \div 20\%$  и даже выше. Подчеркнем здесь, что уменьшение величины сжатой глубины  $h_c$  на 10% вызывает увеличение числа Фруда в сжатом сечении ( $Fr_c = q^2/g h_c^3$ ) на 37%. Уменьшение же  $h_c$  на 20% приводит к увеличению числа Фруда на 95%, т.е. почти в 2 раза. Это обстоятельство несомненно следует иметь в виду при решении всего комплекса вопросов сопряжения бьефов, например при расчете размеров гасителей энергии, длины крепления русла и др.

Таким образом, существующий метод определения сжатой глубины по уравнению Бернулли (1) ввиду отмеченной выше неопределенности рекомендаций для назначения коэффициента скорости  $\varphi$ , величина которого в настоящее время может быть определена лишь эмпирически, не может иметь существенных преимуществ перед определением  $h_c$  по зависимости, полученной в результате проведения систематических опытов. Целью данной работы и явилось получение указанной эмпирической зависимости, пригодной для определения сжатой глубины.

Из анализа уравнения (1) и результатов многочисленных опытов ряда исследователей можно заключить, что для сжатой глубины  $h_c$  в нижнем бьефе водослива существует следующая функциональная связь:

$$h_c = f_1(q, E_0, g, \varphi). \quad (4)$$

Рассмотрим некоторые переменные, входящие в функциональное соотношение (4).

Полная удельная энергия потока перед водосливом составляет  $E = P + H_0$ , где полный напор на водосливе  $H = \Psi_1(q, m)$ . Коэффициент расхода  $m$  зависит от очертания оголовка и высоты водослива, а также от геометрического напора  $H$ , изменяющегося на данном водосливе с изменением удельного расхода  $q$ , т.е. для водослива практического профиля, построенного по координатам Кригера - Офицера,  $m = \Psi_2(q, P)$ , и, следовательно,  $H_0 = \Psi_3(q, P)$ . Таким образом, можно для полной удельной энергии потока считать, что

$$E_0 = f_2(q, P). \quad (5)$$

Коэффициент скорости  $\varphi$  зависит от сопротивлений на входе водослива и сопротивления при движении потока по водосливной поверхности. Сопротивление на входе неподтопленного водослива зависит от формы оголовка, которая характеризуется коэффициентом расхода  $m = \Psi_2(q, P)$ . Сопротивление по длине определяется длиной водосливной поверхности и ее шероховатостью, а также глубиной потока. Длина водосливной поверхности водослива практического профиля, построенного по координатам Кригера - Офицера, зависит от высоты водослива и профилирующего напора или, что то же самое, от расхода, соответствующего профилирующему напору. Изменение глубины потока вдоль водосливной поверхности на дан-

ном водосливе зависит от пропускаемого расхода. Таким образом, принимая подобие водосливной поверхности на различных водосливах практического профиля (материал - бетон, профиль построен по координатам Кригера - Офицерова), можно считать, что коэффициент скорости  $\varphi$  является функцией высоты водослива и пропускаемого расхода, т.е.

$$\varphi = f_3(q, P). \quad (6)$$

Функциональная связь (6) подтверждается исследованиями Г.П. Скробкова и Г.Х.Ибрагимовой, о чем было сказано выше.

С учетом (5) и (6) для  $h_c$  получим следующее функциональное соотношение:

$$h_c = f(q, P, g). \quad (7)$$

В соответствии с методами теории размерности была получена функциональная зависимость, характеризующая связь сжатой глубины с факторами, влияющими на ее образование, в виде

$$\frac{h_c}{P} = f\left(\frac{P^3 \cdot g}{q^2}\right)^c \quad \text{или} \quad \frac{h_c}{P} = f\left(\frac{P}{h_{кр}}\right)^{3c}, \quad (8)$$

где  $h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{q}{g}}$  - критическая глубина для прямоугольного русла (при  $\alpha = 1$ ).

Для получения эмпирической зависимости в явном виде были использованы результаты исследований автора, проведенных в горизонтальных гидравлических лотках шириной 0,24, 0,50 и 1,50 м на четырех водосливах практического профиля с водосливной поверхностью, очерченной по координатам Кригера - Офицерова и высотой  $P = 0,233$  м (профилирующий напор  $H_{пр} = 0,10$  м), 0,205 и 0,526 м ( $H_{пр} = 0,20$  м) и 0,50 м ( $H_{пр} = 0,15$  м). Водосливная поверхность выполнялась из металлического листа, покрашенного масляной краской. Расход воды измерялся по треугольным водосливам Томсона, отметки свободной поверхности - мерными иглами. Сжатая глубина  $h_c$  определялась по оси потока как осредненная глубина при трех-четырёхкратном измерении для каждого расхода.

На рис. 1 представлены результаты 62 опытов автора данной статьи. Как следует из рис. 1, опытные точки, располагаясь кучно, образуют кривую, которая дает основание, во-первых, считать, что принятая функциональная связь (8) достаточно правильно учитывает факторы, влияющие на образова-

ние сжатой глубины  $h_c$ , и, во-вторых, позволяет получить указанную функциональную зависимость в явном виде.

Используя методы статистической обработки опытных данных (метод средних и метод наименьших квадратов), на основании результатов опытов, представленных на рис. 1, получено уравнение

$$\frac{h_c}{P} = 0,55 \left( \frac{h_{кр}}{P} \right)^{4/3} \quad (9)$$

Кривая по этому уравнению на рис. 1 подтверждает соответствие (9) опытным данным.

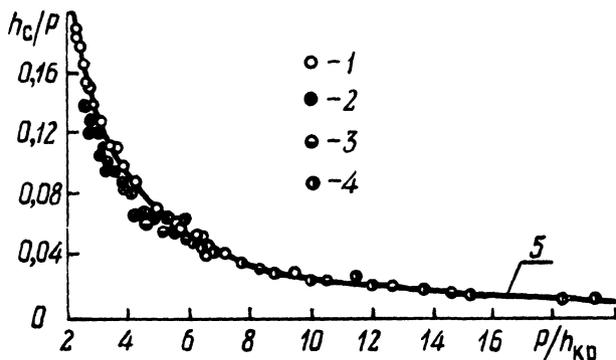


Рис. 1. К выводу формулы для определения сжатой глубины. Экспериментальные данные для водосливов высотой  $P$ :

1 - 0,205 м; 2 - 0,233; 3 - 0,500; 4 - 0,526 м; 5 - по уравнению (9).

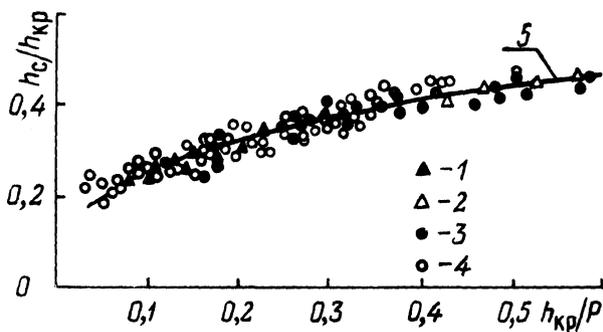


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных с подсчитанными значениями сжатой глубины по:

1 - И.М.Бойко; 2 - Г.П.Скребкову; 3 - Д.И.Кумину; 4 - по данным автора; 5 - по (10).

Уравнение (9) может быть представлено в виде формулы

$$h_c = 0,55 h_{кр} \sqrt[3]{\frac{h_{кр}}{P}}, \quad (10)$$

которая рекомендуется для практического использования. Зная высоту водослива со стороны нижнего бьефа  $P$  и удельный расход  $q$  (для подсчета критической глубины  $h_{кр}$ ), можно определить сжатую глубину  $h_c$ .

На рис. 2 для сравнения представлены кривая по формуле (10) и в виде опытных точек – результаты упомянутых исследований автора, а также опытов И.М.Бойко [7], проведенных на трех водосливах практического профиля, очерченных по координатам Кригера – Офицерова ( $P = 0,706, 0,493$  и  $0,306$  м). Кроме того, на рис. 2 представлены результаты опытов Г.П.Скрёбкова [4] и Д.И.Кумина [8] (опыты 1940 г., сер. II и часть сер. УI). Здесь следует отметить, что опыты Г.П.Скрёбкова проводились на водосливах как практического (“теоретического”) профиля, так и с изменяемыми оголовками, а опыты Д.И.Кумина – на моделях плотин разной высоты полигонального очертания с водосливной поверхностью, плавно сопрягаемой с горизонтальным носком (уступом), толщина струи на котором принималась за сжатую глубину.

Расположение экспериментальных точек относительно кривой по формуле (10) (см. рис. 2) является достаточно близким: разброс точек составляет в среднем  $\pm 4\%$ . Учитывая неизбежные ошибки в опытном измерении сжатой глубины, такую погрешность можно считать вполне допустимой. Кроме того, необходимо отметить, что формула (10), полученная при использовании экспериментальных данных водосливов практического профиля с водосливной поверхностью, очерченной по координатам Кригера – Офицерова, дает результаты, вполне приемлемые и для водосливов практического профиля полигонального очертания (см. рис. 2). Это обстоятельство подтверждает справедливость мнения Г.П.Скрёбкова [4] о первостепенной роли высоты водослива и напора (или расхода) в процессе образования сжатой глубины. Однако данное утверждение, по-видимому, не может быть отнесено к любым водосливам практического профиля, и в частности, к “обжатым” или вакуумным.

В табл.1 представлены опытные данные Д.И.Кумина [8] (1937 г.), не показанные на рис. 2, и для сравнения результаты подсчета сжатой глубины  $h_c$  по формуле (10) и по

Таблица 1. Сравнительные подсчеты сжатой глубины

Высота водослива Р, см	Удельный расход q, см <sup>2</sup> /с	Напор Н, см	Критическая глубина h <sub>кр</sub> , см	Коэффициент φ		Сжатая глубина h <sub>с</sub> , см				δ = $\frac{h_{расч} - h_{оп}}{h_{оп}} \cdot 100\%$		
				по Г.П. Скребок- кову (2)	по Г.Х. Ибрагим- овой (3)	Опыт- ная	по уравнению (1)		по (10)	по (1)		по (10)
							с φ по (2)	с φ по (3)		с φ по (2)	с φ по (3)	
25	1450	18,2	12,88	0,979	0,949	5,55	5,41	5,70	5,68	-2,0	+2,7	+2,3
25	1210	16,1	11,42	0,976	0,934	4,70	4,63	4,86	4,77	-1,5	+3,4	+1,5
30	1130	13,4	10,91	0,965	0,897	4,30	4,22	4,56	4,29	-1,9	+6,0	-0,2
30	970	12,1	9,85	0,962	0,887	3,76	3,67	4,00	3,74	-2,4	+6,4	-0,5
30	807	10,9	8,71	0,957	0,876	3,18	3,10	3,40	3,17	-2,5	+6,9	-0,3
35	725	9,8	8,11	0,945	0,850	2,73	2,67	2,98	2,74	-2,2	+9,2	+0,4
35	645	9,3	7,50	0,942	0,845	2,45	2,39	2,67	2,47	-2,4	+9,0	+0,8
35	565	8,6	6,87	0,937	0,837	2,20	2,11	2,37	2,20	-4,1	+7,7	0
40	516	7,8	6,47	0,921	0,815	1,93	1,87	2,11	1,94	-3,1	+9,3	+0,5
40	451	7,2	5,91	0,914	0,807	1,72	1,65	1,87	1,72	-4,1	+8,7	0

уравнению Бернулли (1) (решение которого проводилось методом постепенного приближения) с коэффициентами скорости  $\varphi$ , предварительно определенными по эмпирическим формулам Г.П.Скробкова (2) и Г.Х.Ибрагимовой (3).

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 2, свидетельствует о возможности практического использования формулы (10) для определения сжатой глубины в нижнем бьефе безвакуумных водосливов практического профиля. Применение этой формулы до проведения соответствующих исследований следует ограничить достаточным для практики использованием водосливов практического профиля пределом  $h_{кр}/P \leq 0,6$ .

Таким образом, полученная на основании методов теории размерности и экспериментальных данных формула (10), не требующая предварительного назначения коэффициента скорости, хорошо согласуется с опытными данными ряда исследователей и может быть использована для определения сжатой глубины в нижнем бьефе водосливов практического профиля при  $h_{кр}/P \leq 0,6$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Павловский Н.Н. Гидравлический справочник. - М., - Л., 1937.
2. Примеры гидравлических расчетов/Под ред. А.И. Богомолова. - М., 1977.
3. Справочник по гидравлическим расчетам/ Под ред. П.Г.Киселева. - М., 1974.
4. Скробков Г.П. Выбор численных значений коэффициента скорости  $\varphi$ . - Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1960, №8.
5. Скробков Г.П. К вопросу о численных значениях коэффициента скорости. - Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1961, №12.
6. Ибрагимова Г.Х. Коэффициент скорости для сжатого сечения за водосливом. - Тр. Азерб. НИИ водных проблем, 1972, вып. 3.
7. Бойко И.М. Исследование и расчет водобойного колодца и рисбермы: Дис. ... канд. техн. наук. - Ровно, 1974.
8. Кумин Д.И. Сопряжение бьефов при поверхностном режиме. - Л. - М., 1948.