

В. Н. ЖАМАГОРЦЯН

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЛНЫ ВДОЛЬ БОКОВОГО ВОДОСЛИВА

Настоящая статья освещает экспериментальную часть работы, являющуюся продолжением [1], в которой рассматривалось только теоретическое решение задачи.

Из экспериментальных исследований по данному вопросу известна только работа Джентилини [2]. Он получил интересные данные, исследуя профиль волны до и после бокового водослива. Регистрацию профиля волны он производил киностемкой. Опыты были произведены для разных длин бокового водослива, но для одного размера поперечного сечения потока.

В лаборатории Водно-энергетического института АН АрмССР были поставлены опыты для двух размеров поперечного сечения при разных длинах порога бокового водослива. Регистрации профиля волны производилась при помощи прямой электрической схемы, состоящей из электродов, погруженных в воду и включаемых электрическую цепь, питающуюся аккумуляторной батареей [3].

Все данные измерений получались автоматической записью на осциллограф. Модельная установка представляла собой лоток прямоугольного сечения шириной $B = 50$ см, длиной 12,0 м, имеющий уклон дна 0,004. В средней части лотка был устроен боковой водослив, длину (L) которого по желанию можно было изменить от 0 до 4 м. Порог водослива всегда оставался параллельным дну. Лоток в конце был снабжен щитовым устройством, при помощи которого можно было внезапно остановить первоначальное движение воды. Щит приводился в движение вручную. Мерное устройство и устройство для подачи воды были размещены в начале лотка. Уровень свободной поверхности при первоначальном равномерном движении во всех опытах совпадал с гребнем. Таким образом, расстояние от дна до порога бокового водослива было равно глубине первоначального равномерного движения (H_0). В табл. 1 указаны основные геометрические и гидравлические данные модельной установки опытов Джентилини и автора.

Таблица 1

Опыты	H_0		Кoeffициент m	Длина порога бокового водослива h , м	Расходы воды Q_0 , л/сек				
	Глубина H_0 , см	Ширина B , см			10	15	20	25	30
Джетилини	15	50	0,47	1,0 2,0 3,0 4,0	10	15	20	25	30
Автора (I серия)	30	50	0,47	1,0 2,0 3,0 4,0	20	30	40	50	—
Автора (II серия)	15	25	0,352	0,8 1,2 1,6 2,0	6,05	8,15	10,45	12,8	14,65

Профиль порога бокового водослива при прямом расположении к потоку был отдельно испытан с целью определения коэффициента расхода m в формуле:

$$Q = mb\sqrt{2g} H^{3/2}.$$

Все опыты соответствуют внезапному полному прекращению, первоначального движения.

На рис. 1, как образец, показана часть осциллограммы. Левую сторону занимает тарировка электродов, произведенная в миле крат-

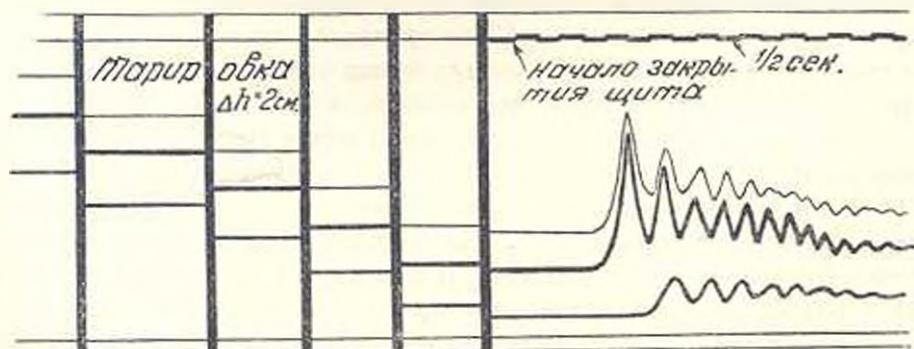


Рис. 1. Образец записи волны.

ковременной записи, после каждого погружения электродов на 2 см ($\Delta h = 2$ см). В правой части—запись волны (два электрода находились в начальном створе) и запись отметчика времени. Регистрация волны электродами, расположенными в одном поперечном створе, показывает, что пик одного и того же вала в различных точках по ширине створа проходит не совсем в одинаковые моменты времени, но эти различия во времени так малы, что практически первый и последующие валы остаются перпендикулярными к оси лотка или к гребню водослива. При движении волны вдоль бокового водослива валы по ши-

рине не разрушаются, и не нарушается их порядковое движение, которое имело бы место при отсутствии бокового водослива. Однако перпендикулярное к оси канала движение валов вовсе не означает, что влияние водослива по ширине лотка сказывается мгновенно. Хотя валы в плане остаются практически перпендикулярными к порогу, но по высоте они деформируются и по длине, и по ширине канала.

Например, для первой серии опытов при $Q_0 = 30 \text{ л/с}$ поперечный гидравлический уклон в начальном участке бокового водослива равнялся приблизительно 0,02.

Все это позволяет с введением некоторого коэффициента ρ , как корректива на немгновенное распространение изменения расхода от слива по ширине потока, рассматривать движение волны вдоль бокового водослива как одномерное [1].

Одной из величин, входящих в расчетные выражения для определения уменьшения высоты волны, является скорость распространения волны и ее изменение вдоль водосливного порога. Скорость распространения волны в данном сечении практически невозможно было определить ввиду ее непрерывной изменяемости вдоль порога бокового водослива. В опытах было определено только ее среднее значение на некотором отрезке, длина которого была 1,0 м и больше.

Регистрация электрическим методом времени пробега волны от одного до другого сечения, практически, дает точные результаты, так как такой способ не обладает инерционностью. Но ошибки могут быть визуальные, вызванные при определении среднего на отрезке ΔL значения скорости $C = \Delta L / \Delta t$. На осциллограмме Δt определяется по расстоянию между пиками первых валов. Но пики иногда, особенно для пологих валов, получаются не совсем характерными. Поэтому приходится зачастую для Δt брать расстояния между осями валов, что приводит хотя и к малой, но все же к некоторой ошибке. Ошибка уменьшится по мере увеличения ΔL . Например, для $\Delta L = 4,0 \text{ м}$ она не превосходила 2–5%.

При внезапной полной остановке движения возникшая обратная положительная волна будет распространяться со скоростью C_0 . Эта скорость, как было показано в [1], определяется по преобразованной формуле Сен-Венана:

$$\frac{C_0}{\sqrt{gH_0}} = \frac{1}{2} \left(1 - Fr + \sqrt{1 + Fr + Fr^2} \right), \quad (1)$$

где $Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gH_0}}$ — число Фруда,

V_0 — скорость частиц при первоначальном установившемся движении.

Удовлетворительное совпадение точек $\frac{C_0}{\sqrt{gH_0}} = f(Fr)$ (рис. 2)

лишний раз подтверждает реальность применения формулы Сен-Венана в подобных случаях. Рис. 2 показывает незначительное изменение

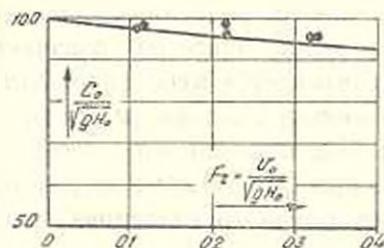


Рис. 2. Расчетные и опытные значения $\frac{C_0}{\sqrt{gH_0}}$ от числа Фруда.

$\frac{C_0}{\sqrt{gH_0}}$ от числа Фруда.

Волна, имея скорость C_0 , далее продолжает двигаться вдоль порога бокового водослива со скоростью $C_1 < C_0$ [1]. Рис. 3 показывает изменение расчетных и опытных (1 серия) значений $\frac{C_1}{C_0}$ от относительной длины

порога $\frac{L}{B}$, при разных значениях Fr . Чем больше Fr (или первоначальный расход Q_0), тем больше

изменяется $\frac{C_1}{C_0}$ вдоль порога, так как при этом, благодаря большому значению первоначальной высоты волны Z_0 , сливается больше воды через порог водослива. Вообще, изменение $\frac{C_1}{C_0}$ небольшое. В приведенных на рис. 3 данных оно не превосходит 18—20%.

Непрерывно накладывающиеся друг на друга отрицательные волны ничтожной высоты создавали совершенно плавное изменение профиля волны, благодаря чему, к сожалению, невозможно было произвести измерение их скорости (C_2).

По формуле (см. [1])

$$\frac{C_{2\text{ср}}}{\sqrt{gH_0}} = \frac{1}{2} \left[1 - Fr + \frac{1}{D-1} \left[R - A - \sqrt{3Fr/D} \frac{\sqrt{3Fr+R}}{(\sqrt{3Fr+R}+A)D} \right] \right] \quad (2)$$

для 1. II серии и для условий опытов Джентилини подсчитаны средние величины относительной скорости распространения обратной положительной волны $\frac{C_{2\text{ср}}}{\sqrt{gH_0}}$, при разных значениях относительной высоты волны до водослива $\frac{Z_0}{H_0}$ и относительной длины порога бокового

водослива $\frac{L}{B}$.

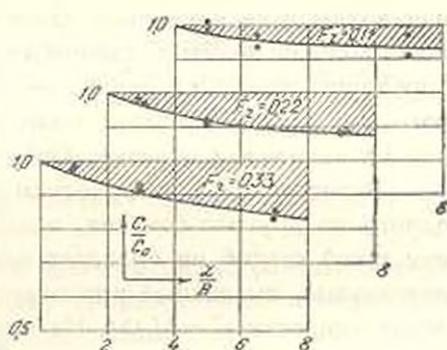


Рис. 3. Изменение $\frac{C_1}{C_0}$ вдоль $\frac{L}{B}$ при разных значениях Fr .

Аналогичный подсчет сделан для относительной средней скорости распространения отрицательной прямой волны $\frac{C_{2cp}}{\sqrt{gH_0}}$ по формуле:

$$\frac{C_{2cp}}{\sqrt{gH_0}} = \left(1 + \frac{Z_0}{2H_0D}\right) + \left(1 - \frac{1}{D}\right)Fr. \quad (3)$$

Результаты подсчетов для I и II серий опытов приведены на рис. 4 и

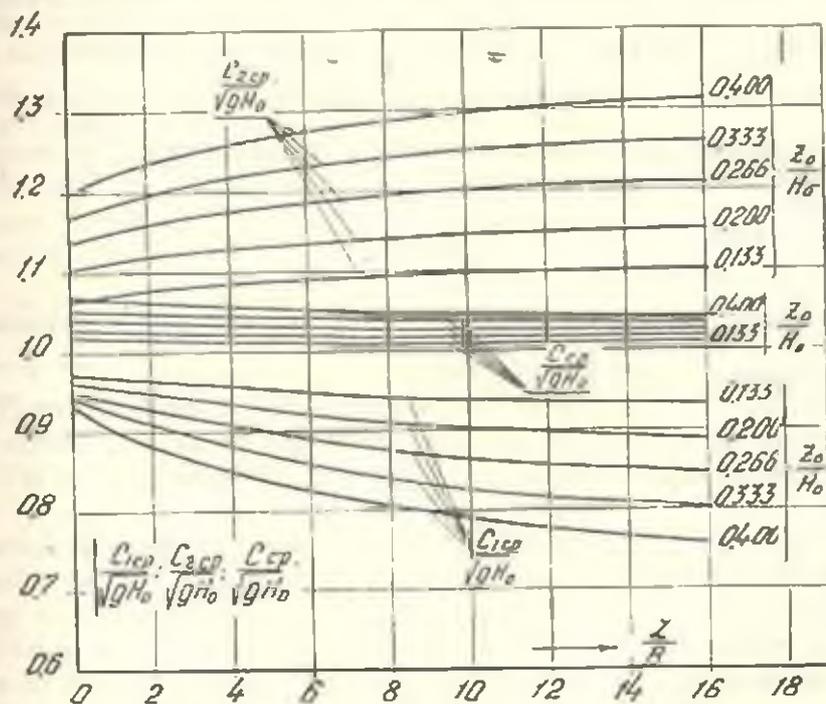


Рис. 4. Значения $\frac{C_{1cp}}{\sqrt{gH_0}}$, $\frac{C_{2cp}}{\sqrt{gH_0}}$ и $\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}}$ от $\frac{Z_0}{H_0}$ и $\frac{L}{B}$ для условий I и II серий опытов.

виде кривых зависимостей $\frac{C_{1cp}}{\sqrt{gH_0}}$ и $\frac{C_{2cp}}{\sqrt{gH_0}}$ от $\frac{Z_0}{H_0}$ и $\frac{L}{B}$. На том же рис. 4 в аналогичной форме представлены кривые их среднеарифметических значений $\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}}$. В этих подсчетах принято отношение

$\frac{a}{p} = 1$. Приведенные кривые показывают, что если $\frac{C_{1cp}}{\sqrt{gH_0}}$ и $\frac{C_{2cp}}{\sqrt{gH_0}}$

вдоль $\frac{L}{B}$ изменяются до 20% своего начального значения,

то $\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}}$ изменяется весьма слабо, всего на несколько

процентов. Кроме того, на $\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}}$ мало оказывает влияния изменение $\frac{Z_0}{H_0}$. Такой результат получается потому, что законы изменения $\frac{C_{119}}{\sqrt{gH_0}}$ и $\frac{C_{229}}{\sqrt{gH_0}}$ от $\frac{L}{B}$ и $\frac{Z_0}{H_0}$ очень близки друг к другу и являются почти зеркальными изображениями. Причем при других, несколько отличных от единицы значениях $\frac{\sigma}{\rho}$ картина не меняется.

Эти данные показывают, что в практических подсчетах величину $\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}}$ можно принимать постоянной и независимой от $\frac{Z_0}{H_0}$ и $\frac{L}{B}$ и равной:

$$\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}} = 1. \quad (4)$$

Наибольшее отклонение значения $\frac{C_{cp}}{\sqrt{gH_0}}$ от единицы в приведенном примере (рис. 4) составляет 7–8%.

Аналогичный результат получается и для условий опытов Джентилини, которые здесь не приводятся, так как характер кривых тот же, кроме значения коэффициента расхода, который вместо $m = 0,47$ у Джентилини $m = 0,352$.

Для практики конечной целью расчета должно быть нахождение не средней высоты, а максимальной высоты волны Z_{max} после бокового водослива, так как после водослива высота остающихся валов превосходит среднюю высоту волны. Средней высотой волны называется та высота, по которой определяется объем волны [4]. Практически измерение этой высоты, благодаря наличию передовых валов (рис. 1), затруднительно, так как скорость распространения и объем волны на участке бокового водослива переменные. Поэтому его значение определялось графически по очертанию волны. Джентилини считает, что средняя высота первого вала равна одной четверти части суммы высот первого и второго максимума и удвоенной величине первого минимума. В наших расчетах она принималась равной полусумме высот первого максимума и первого минимума. Поэтому значение, определенное по Джентилини, получается несколько меньше наших.

Результаты наших опытов и опытов Джентилини показывают, что значения средней высоты волны до водослива всегда меньше полученного по расчету.

На рис. 5 сопоставлены расчетные и опытные значения (I, II серии и Джентилини) относительной высоты волны $\frac{Z_0}{H_0}$ до уменьшения в зависимости от числа Фруда. Из сопоставления следует, что опытная (пунктирная) линия проходит несколько ниже расчетной. Разность между

расчетными и опытными значениями пропорциональна абсолютной вели-

чине $\frac{Z_0}{H_0}$. Только последние

опытные две точки Джентилини нарушают это правило. По-видимому, данные Джентилини по этим двум точкам ошибочные, так как наши точки являются средними значениями большого количества опытных данных. Расхождение между опытными и расчетными значениями

$\frac{Z_0}{H_0} < 10\%$, поэтому им

можно пренебречь, тем более, что в расчетах эта разница приводит к незначительному преувеличению высоты волны после водослива.

На рис. 5 горизонтальной линией отмечена зона обрушения волны $\frac{Z_0}{H_0} = 0,28$ (по определению Файра [5]). Хотя для первой серии

опытов значение $\frac{Z_0}{H_0}$ несколько выходит за пределы 0,28, при этом $Q_0 = 30$ л/с, обрушения не замечалось. Последнее случилось при $Q_0 > 33-35$ л/с.

Для сопоставления расчетных и опытных значений высоты волны после уменьшения боковым водосливом были произведены измерения высоты волны до и после водослива (I и II серия), а также использованы данные опытов Джентилини. Среди опытов I и II серии имеются и повторные.

На рис. 6 в виде кривых представлены значения коэффициента уменьшения высоты волны K ($K = \frac{Z}{Z_0}$, где Z — средняя высота волны после бокового водослива) в зависимости от $\frac{Z_0}{H_0}$ и $\frac{L}{B}$, полученные по расчету. Расчеты произведены по формуле:

$$K = \frac{1}{\left(1 + \frac{\sin \sqrt{2}}{4\rho} \sqrt{\frac{gZ_0 L}{C_{cp} B}}\right)} \quad (5)$$

в которой C_{cp} определен по (2) и (3).

На том же рисунке приведены данные 46 опытов I серии 41 опыта II серии. Благодаря тому, что в I и II серии коэффициенты

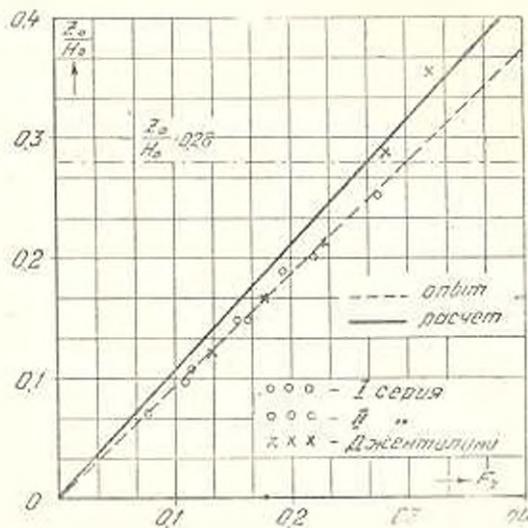


Рис. 5. Опытные и расчетные значения $\frac{L_0}{H_0}$ от F_g .



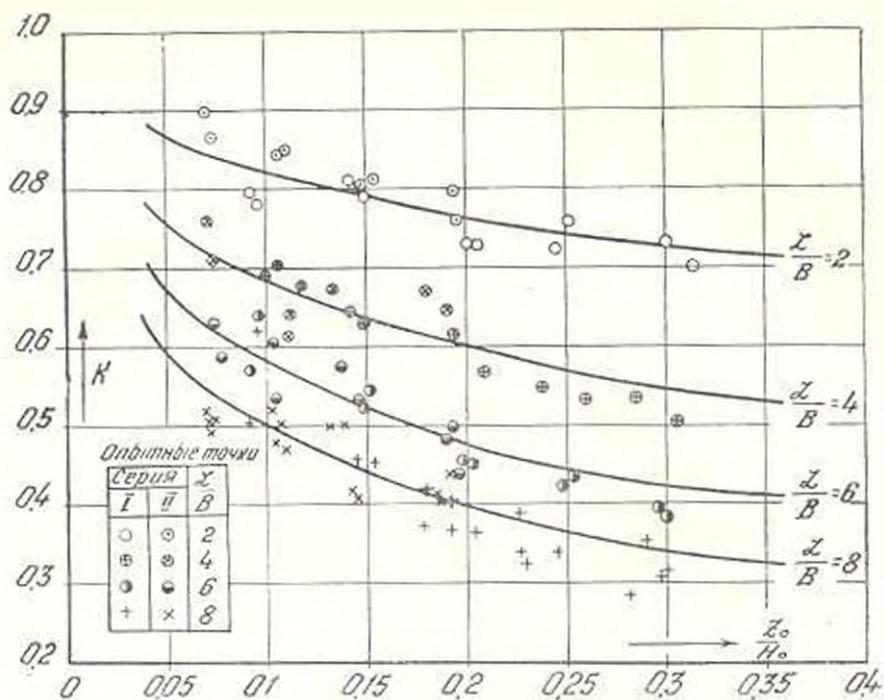


Рис. 6. Расчетные и опытные значения K от $\frac{Z_0}{H_0}$ и $\frac{L}{B}$ для I и II серии.

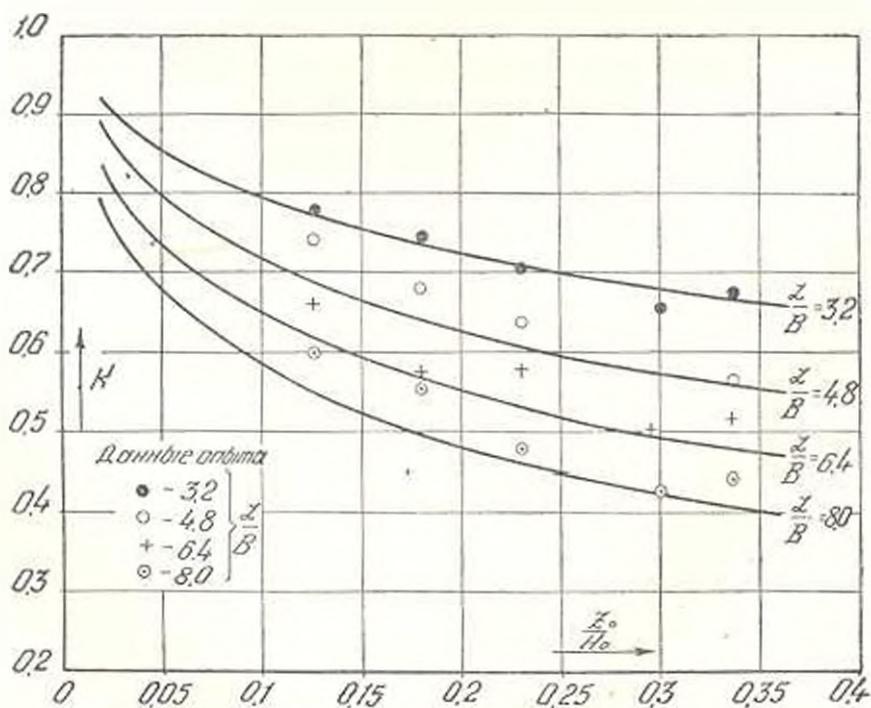


Рис. 7. Расчетные значения K от $\frac{Z_0}{H_0}$ и $\frac{L}{B}$ и опытные данные Дзентилини.

расхода водослива m имеют одинаковые значения, стало возможным сопоставление произвести в одном графике.

Аналогичный график (рис. 7) составлен для опытов Джентилини (20 опытов). При этом значения Z_0 и Z взяты из таблицы указанного автора, а не с волнограммы, так как последние в [2] даны не для всех случаев. Результаты совпадения данных опыта с расчетными, как видно, удовлетворительные. Максимальное отклонение отдельных опытных точек от соответствующих расчетных значений составляет 10–15%, а в среднем гораздо меньше.

При расчетах C_{cp} и K величина $\frac{g}{p}$ принималась равной единице.

Другие значения приводили к неудовлетворительным результатам. Удовлетворительное совпадение опытных и расчетных данных при $\frac{g}{p} = 1$ говорит о том, что коэффициенты ε и p практически равны друг другу.

Пользуясь расчетными кривыми K , по опытным значениям $\frac{Z_0}{H_0}$ найдены соответствующие коэффициенты уменьшения высоты волны K , и, следовательно, при помощи последних определены расчетные величины Z . На рис. 8 сопоставлены данные по Z опыта и расчета, наглядно показывающие степень совпадения этих значений.

Таким образом, все это позволяет считать практически приемлемой расчетную схему, положенную в основу теоретических выводов.

На основании данных опытов I и II серии получена связь между $\frac{Z_{max}}{Z}$ и $\frac{Z}{H_0}$ (рис. 9), как это делал Фавр [5]. Z_{max} во всех случаях соответствует максимуму высоты первого вала. Исходные величины Z_{max}

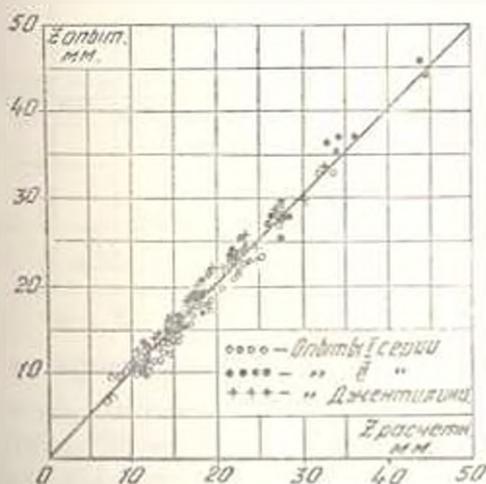


Рис. 8. Сопоставление расчетных и опытных значений уменьшенной высоты волны Z .

и Z относятся не только к началу и концу водослива, но и к промежуточным створам. На том же рис. пунктирной линией показана кривая и опытные точки Фавра. Расхождение между нашими данными и данными Фавра очевидно. Фавр производил свои опыты в условиях, аналогичных нашим, с той разницей, что он рассмотрел только полное движение с неизменным расходом вдоль пути, а наши опыты произведены с переменным расходом и с неизменным расходом вдоль пути, причем для разных размеров попереч-

ного сечения лотка. Полученные нами для всех случаев точки, практически, ложатся на одну прямую, которая выражается следующим уравнением:

$$\frac{Z_{\max}}{Z} = 1,15 + 1,50 \frac{Z}{H_0} \quad (6)$$

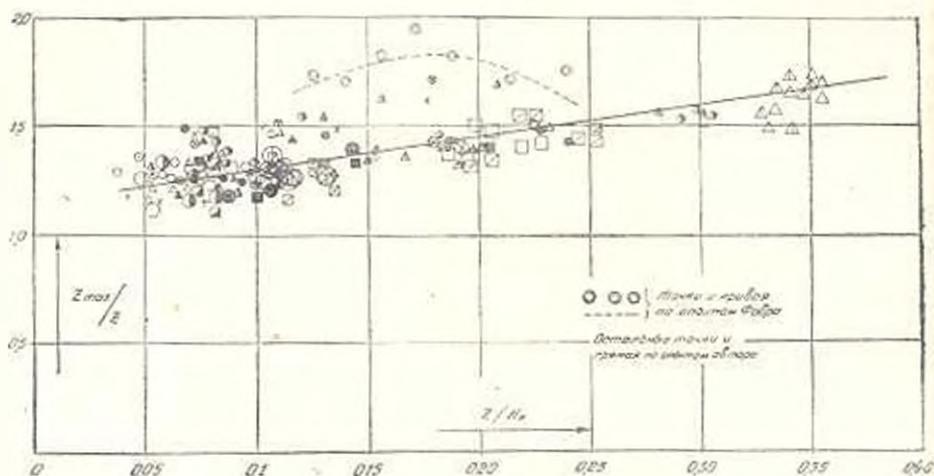


Рис. 9. $\frac{Z_{\max}}{Z} = f\left(\frac{Z}{H_0}\right)$ по опытам Фавра и автора.

Нашими опытами подтверждается заключение Дженглини о том, что при больших расходах максимальную высоту, после уменьшения, имеет не первый вал, а валы после второго или третьего. Однако максимальная высота последующих валов не намного больше высоты первого вала и этой разницей вполне можно в расчетах пренебречь.

Из опытов также очевиден вывод, сделанный в [1] о том, что если при установившемся движении сбрасываемому через боковой водослив расходу Q_0 на пороге соответствует глубина h , то какой бы величины ни была средняя высота волны до водослива Z_0 , всегда средняя высота волны после водослива Z меньше, чем h . В подтверждение сказанного на рис. 10 приводятся опытные данные, полученные при $Q_0 = 30$ л/с и при четырех значениях длины порога (1, 2, 3 и 4 м) для I и II серии, которые показывают, что чем короче длина бо-

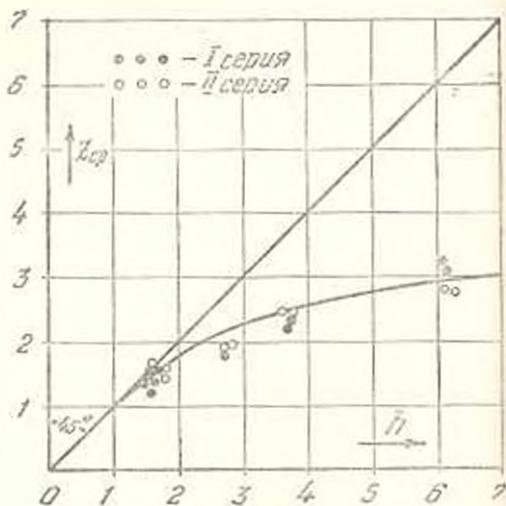


Рис. 10. Сравнение опытных значений Z и h .

вого водослива, тем Z меньше h . Только в случае, когда длина порога стремится к бесконечности, $Z = h = 0$.

Пример расчета. Даны: $H_0 = 4,0$ м, $B = 6,0$ м, $m = 0,42$, $Q_0 = 40$ м³/с, $L = 60$ м. Определить возникшую в результате внезапной полной остановки первоначального движения высоту волны после бокового водослива (после уменьшения).

Решения: Скорость распространения волны до водослива, по (1), равна:

$$C_0 = \frac{\sqrt{gH_0}}{2} (1 - Fr + \sqrt{1 + Fr + Fr^2}),$$

где $Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gH_0}} = \frac{40}{6 \cdot 4 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 4}} = 0,266$. Следовательно,

$$C_0 = \frac{\sqrt{9,81 \cdot 4}}{2} (1 - 0,266 + \sqrt{1 + 0,266 + 0,266^2})$$

Высота волны до водослива будет:

$$Z_0 = \frac{Q_0}{C_0 B} = \frac{40}{5,93 \cdot 6} = 1,12 \text{ м.}$$

Скорости C_{cp} по (4) будет $C_{cp} = \sqrt{gH_0} = 6,26$ м/с (по (2) и (3) $C_{cp} = 6,42$ м/с).

Коэффициент уменьшения по (5) равен:

$$K = \frac{1}{\left(1 + \frac{0,42 \sqrt{2}}{4} \frac{\sqrt{9,81 \cdot 1,12}}{6,24} \frac{60}{6}\right)^2} = 0,314.$$

Следовательно, $Z = kZ_0 = 0,35$ м, а максимальная высота первого вала после водослива, согласно (6), будет:

$$\frac{Z_{max}}{Z} = 1,15 + 1,5 \frac{1,12}{4,0} = 1,57 \text{ или } Z_{max} = 0,55 \text{ м}$$

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 21 I 58

Վ. Ն. ԿԱՍՏՆՈՐՅԱՆ

ԿՈՂԱՅԻՆ ԶՐԹԱՓԻ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅԱՄԻ ՇԱՐԺԱՆՈՂ ԱԿՏԻ
ԼԱՐՈՐԱՏՈՐ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Այս հոդվածում քննարկվում է արտավազ հաշվալին բանաձևերի [1] ցուտադման հարցը, յարտատոր փորձերի միջոցով Այդ նպատակով օդադարձվում է Ջենտիլինիի [2] և Հայկախանյանի ԳՍ. Ջրակներդեպի ինստիտուտում հեղինակի կատարած փորձերի արդյունքները: Վերջինիս համառոտ նկարագրությունը տրված է հոդվածում:

Փորձնական տվյալներից ստացված կարևոր հետևություններից մեկն այն է, որ ալիքի բարձրություն փոքրացման դարձակցի K -ի (5) բանաձևում

Եղած $C_{\text{ср}}$ (ալիքի տարածման միջին արագությունը) կարելի է գիտել $\frac{Z_0}{H_0}$ և

$\frac{L}{B}$ փոփոխությունից անկախ և հալվասար $\sqrt{gH_0}$, որտեղ Z_0 ալիքի սկզբը-

նական միջին բարձրությունն է, H_0 հաստատված շարժման ժամանակ եղած խորությունն է, L ջրթափի երկարությունը և B ջրատարի լայնությունը:

Փորձերի և հաշվային մեծությունների համեմատությունը ցույց է տալիս, որ նրանց բավարար համընկնումը ստացվում է միայն այն դեպքում, եթե ε և ρ գործակիցները հալվասար են միմյանց:

Ջրատարի տարրեր երկրաչափական չափերի, կողային ջրթափի տարրեր երկարություն ու տարրեր էլքերի դեպքում կատարված փորձերից ստացված են կողային ջրթափից հետո ալիքի փոքրացած միջին բարձրությունների $[Z]$ արժեքները: Այդ արժեքների և $\varepsilon - \rho$ ընդունելությամբ կատարված հաշվային արժեքների նկ. 8 բերված համեմատությունը թույլ է տալիս բնիզանելի համարել բանաձևերի արտածման հիմքում ընկած հաշվային սխեման:

Ամենատարբեր պայմանների դեպքում կատարված փորձերի բազմաթիվ ավելյուններից (նկ. 9) ստացված է (6) արտահայտությունը, որով հեշտությամբ որոշվում է ջրթափից հետո ալիքի մնացած մաքսիմալ բարձրությունը (Z_{max}) հողվածի վերջում բերված է նաև հաշվի օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Жамагорця В. Н. Движение волны вдоль бокового водослива. «Известия АН Армянской ССР» (серия техн. науки) т. XI, № 5, 1958.
2. Br. no. *Geophysical*, *Uzghime* *di* *uno* *silomonte* *laterale* *su* *l'ion* *la* *positiva* *ascendente* *in* *un* *canale*. *L'Encicla* *Etetica*, № 4, 1950.
3. Жамагорця В. Н. и Овсепян К. А. «Пособ измерения волновых колебаний по исе елзаянии я лаборатории неустанови шегося «движения жидкости». «Известия АН АрмССР», т. IX, № 6, 1953.
4. *Егвазаров* *Н. В.* *Поуси* *и* *вишесел* *движение* *и* *длинных* *бьерх*. «Известия ВНИИГ» № 21, 1933.
5. *Fauve* *H.* *Etude* *theorique* *et* *experimentale* *sur* *les* *ondes* *de* *translation* *dans* *les* *canaux* *decouverts*. Dunod, 1933.