

2.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 110

1957

Х. А. ТИБАР

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
НЕЗАТОПЛЕННОГО ВОДОСЛИВА
С ШИРОКИМ ПОРОГОМ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

Х. А. ТИБАР

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
НЕЗАТОПЛЕННОГО ВОДОСЛИВА
С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Er. 699

ENSV Teaduste Akadeemia
Keskraamatukogu

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью настоящей работы является систематическое и детальное экспериментальное исследование коэффициента расхода водослива с закругленными входными ребрами в условиях плоской и пространственной задачи. Кроме того экспериментально изучалась также и пропускная способность водослива с нулевой высотой порога при прямоугольных и закругленных входных ребрах. В настоящей статье приводится краткое изложение результатов экспериментальных исследований и даются выводы и предложения по расчету незатопленного водослива с широким порогом.

Экспериментальные исследования были проведены в лаборатории гидротехники Таллинского Политехнического Института в 1955/56 гг. Большинство опытов было проведено в стеклянном лотке шириной 30,3 см, рабочей длиной 6,0 м, высотой 60 см и с максимальным расходом 25 л/сек, который измерялся прямоугольным мерным водосливом.

Тарировка мерного водослива была осуществлена объемным способом при помощи специального тарировочного бака, временно установленного в конце экспериментального лотка.

При каждом опыте по измеренным значениям расхода Q и напору H вычислялись коэффициент расхода водослива по формуле:

$$m_0 = \frac{Q}{b \sqrt{2gH^{3/2}}}, \quad (1)$$

коэффициент расхода водослива по формуле:

$$m = \frac{Q}{b \sqrt{2gH_0^{3/2}}}, \quad (2)$$

где

$$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g},$$

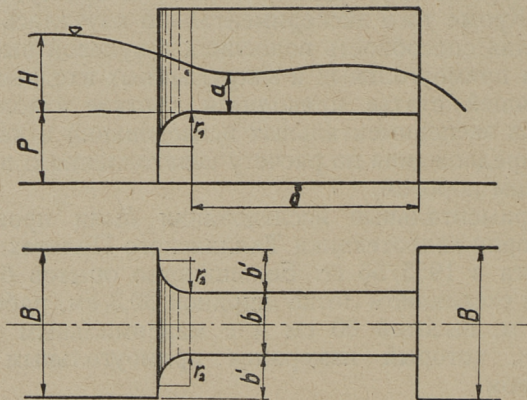
причем v_0 — скорость подхода, равная

$$v_0 = \frac{Q}{b(p+H)},$$

а также соотношения

$$\frac{\delta}{H}, \frac{p}{H}, \beta = \frac{b}{B}, \frac{r_1}{H}, \frac{r_2}{b} \text{ и } \sigma = \frac{\beta}{1 + \frac{p}{H}},$$

где все обозначения указаны на фиг. 1.



Фиг. 1.

1. ВОДОСЛИВ БЕЗ БОКОВОГО СЖАТИЯ (плоская задача)

1. ВОДОСЛИВ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ВХОДНЫМ РЕБРОМ

Как известно, теоретическое решение М. Д. Чертоусова для незатопленного водослива с широким порогом [Л.1]¹ приводит к следующим зависимостям:

¹ В списке литературы, стр. 35, указываются только те опубликованные работы, которые непосредственно использовались в нашей работе.

Коэффициент расхода водослива

$$m_0 = \Psi_a \sqrt{\frac{\Psi_a}{1 + \sigma^2 \Psi^2}}, \quad (3)$$

где

$$\Psi_a = \frac{a}{H}$$

и

$$\sigma = \frac{bH}{B(H+p)} = \frac{\beta}{1 + \frac{p}{H}}, \quad (4)$$

причем a — наименьшая глубина на пороге водослива (в сжатом сечении).

При этом относительная глубина на пороге водослива (в сжатом сечении) Ψ_a удовлетворяет уравнению:²

$$\sigma^2 \Psi_a^4 - 4\sigma \Psi_a^3 + \Psi_a^2 (5 - \sigma^2) - 1 = 0 \quad (5)$$

Сопоставление значений коэффициента расхода водослива m_0 , найденных с помощью зависимостей (5) и (3), со значениями этого коэффициента по данным опытов М. З. Абрамова, Н. В. Дульнева, М. Базена, Р. Хортона, Х. Дорингсфельда, Д. И. Кумина, Г. И. Сухомена и М. Д. Чертоусова показано на фиг. 2. (Опыты первых четырех авторов будут на фиг. 2 называться старыми опытами)³. На этом рисунке нанесены теоретическая кривая М. Д. Чертоусова $m_0 = F_1(\sigma)$ построенная в соответствии с уравнениями (5) и (3) и все 266 опытные точки вышеуказанных исследователей. Как видим, теоретическая кривая расположена достаточно близко по отношению к опытным точкам.

Общеизвестные эмпирические формулы для определения коэффициента расхода водослива, имеющего прямоугольное входное ребро, следующие:⁴

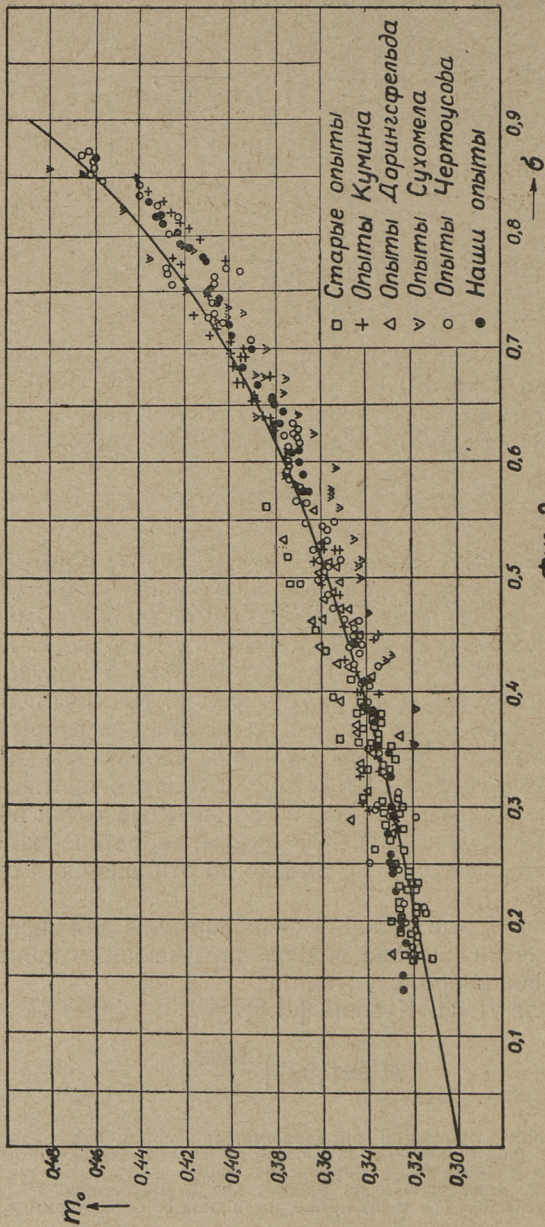
Формула Д. И. Кумина [Л.3]

$$m = 0,32 + \frac{0,065\sigma}{2 - \sigma}, \quad (6)$$

² В целях упрощения определения коэффициента расхода водослива m_0 по формулам (3) и (5) можно пользоваться графиком $m_0 = F_1(\sigma)$ имеющимся в книге М. Д. Чертоусова [Л.2].

³ Фиг. 2. Заимствован из работы М. Д. Чертоусова [Л.1].

⁴ Формулы (6), (7), и (8) приводим в наших обозначениях.



Фиг. 2.

Формула А. Р. Березинского [Л.5]

$$m = 0,32 + 0,01 \frac{4\sigma - 1}{0,75 - 0,29\sigma}, \quad (7)$$

Формула Г. И. Сухомела [Л.7]

$$m = 0,32 + \frac{0,014\sigma}{1 - \sigma}. \quad (8)$$

Заметим, что коэффициент расхода m , определяемый формулами (6), (7) или (8) не содержит в себе поправки на скоростный напор. Коэффициенты расхода m_0 и m связаны между собой такой зависимостью:

$$m = \frac{m_0}{(1 + \sigma^2 m_0^2)^{0,5}}. \quad (9)$$

Сопоставление теоретического решения М. Д. Чертоусова с эмпирическими формулами (6), (7) и (8) показывает,⁵ что эмпирические формулы Д. И. Кумина и А. Р. Березинского и теоретическая формула М. Д. Чертоусова дают весьма хорошее совпадение в коэффициентах расхода m_0 при значениях параметра, σ , лежащих в пределах $0,25 < \sigma < 1,0$, а формула Г. И. Сухомела и формула М. Д. Чертоусова — при значениях параметра σ , лежащих в пределах $0,2 < \sigma < 0,75$.

Следует отметить, что в практике проектирования водослива с широким порогом наиболее часто значения параметра σ находятся в пределах $0,2 < \sigma < 1,0$.

По истечению через водослив с прямоугольным входным ребром нами было проведено 94 опыта в диапазоне $\frac{\delta}{H} = 1,6 - 23,0$ (большинство опытов при $\frac{\delta}{H} = 3 - 8$) и $\frac{p}{H} = 0,2 - 6,7$.

Специальных опытов для определения влияния относительной ширины порога водослива $\frac{\delta}{H}$ на его пропускную способность нами не проводилось, но на основе анализа

⁵ Такое сопоставление теоретического решения М. Д. Чертоусова с эмпирическими формулами Д. И. Кумина и Г. И. Сухомела проведено в работе М. Д. Чертоусова [Л. 1].

наших опытных данных мы считаем возможным подтвердить, что независимость пропускной способности водослива от отношения $\frac{\delta}{H}$ гарантируется в том случае, когда

$$3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8,$$

как это и было установлено ранее М. Д. Чертоусовым [Л. 1].

Сопоставление наших опытных данных с теоретической кривой М. Д. Чертоусова указано на этом же графике, фиг. 2.

Учитывая, что теоретическая кривая М. Д. Чертоусова $m_0 = F_1(\sigma)$ практически достаточно хорошо согласуется с нашими опытными данными и опытными данными других исследователей, это решение принято за основу в наших дальнейших исследованиях, касающихся истечения через водослив с широким порогом.

2. ВОДОСЛИВ С ЗАКРУГЛЕННЫМ ВХОДНЫМ РЕБРОМ

Мы полагаем, что для определения коэффициента расхода водослива с закругленным входным ребром наиболее удачной является формула:

$$m_{0з} = \eta_s m'_{0т}, \quad (10)$$

где $m_{0з}$ — коэффициент расхода водослива с закругленным входным ребром;

$m'_{0т}$ — коэффициент расхода водослива по теоретическому решению М. Д. Чертоусова, т. е. при прямоугольных входных ребрах и

η_s — коэффициент, учитывающий влияние закругления входного ребра водослива на коэффициент расхода водослива (в дальнейшем условимся называть этот коэффициент — коэффициентом закругления).

Для определения коэффициента закругления η_s нами было проведено 207 опытов при значениях $\frac{p}{H} = 0,2 - 10,0$ и $\frac{r_1}{H} = 0,04 - 1,5$.

Большинство опытов было проведено в диапазоне $3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8$. Кроме этих опытных данных мы имели в нашем распоряжении еще 112 опытных точек других исследователей (Д. И. Кумина [Л. 3], А. Р. Березинского [Л. 5], Вудборна [Л. 9] и Базена [Л. 8]).

Анализ экспериментальных данных показывает, что коэффициент η_s является функцией двух переменных: $\frac{p}{H}$ и $\frac{r_1}{H}$, причем граничным условием является:

$$\eta_s = 1 \text{ при } \frac{r_1}{H} = 0.$$

Обработка всех опытных данных показала, что для определения коэффициента закругления η_s представляется возможным предложить такую формулу:

$$\eta_s = 1 + \frac{\frac{p}{H}}{1 + \frac{p}{H}} \sqrt{\frac{0,15 \frac{r_1}{H}}{1 + 2,4 \frac{r_1}{H}}}. \quad (11)$$

Заметим, что верхнее граничное условие этой функции

$$\eta_s = \eta_{s \max} = 1,25 \text{ при } \frac{r_1}{H} \rightarrow \infty$$

не имеет практического значения, так как при $\frac{r_1}{H} \rightarrow \infty$ мы уже не будем иметь водослив с широким порогом, тем более водослив, отвечающий условию $3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8$.

Можем считать, что с увеличением величины r_1 (при данном H) коэффициент расхода водослива увеличивается до некоторого предела, а затем уменьшается вследствие потери напора на длинном входном участке. Как показывают опытные данные, интенсивное увеличение коэффициента η_s (при $\frac{p}{H} = \text{const}$) происходит главным образом в интервале $\frac{r_1}{H} \leq 0,4$. По этой причине в практических приложениях не следует применять значения относительного закругления $\frac{r_1}{H} > 0,4$.

Так как наши опытные точки охватывают область $0 < \frac{r_1}{H} \leq 1,5$, то можем утверждать, что с достаточной степенью точности формула (11) применима при $\frac{r_1}{H} \leq 1,5$.

Сопоставление формулы (11) с опытными данными представлено на фиг. 3 и 4, где построен график функции

$$\eta_s = F_2\left(\sigma, \frac{r_1}{H}\right),$$

а также нанесено опытные точки в координатах σ и η_s .

Как видно из фиг. 3 и 4, предлагаемая нами эмпирическая формула (11) для определения коэффициента η_s достаточно хорошо согласуется как с нашими опытными данными, так и с опытными данными других исследователей в широком диапазоне изменения параметра σ и дает некоторое отклонение от опытных точек Д. И. Кумина и А. Р. Березинского лишь при значениях σ , лежащих в пределах $0,4 \leq \sigma \leq 0,6$.

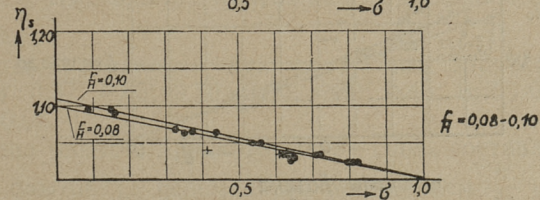
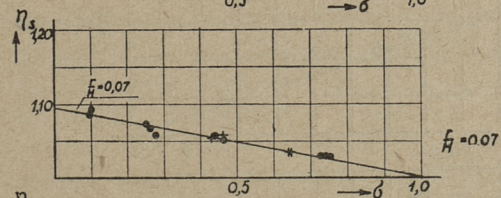
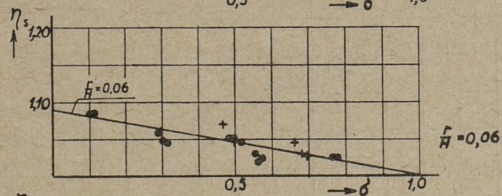
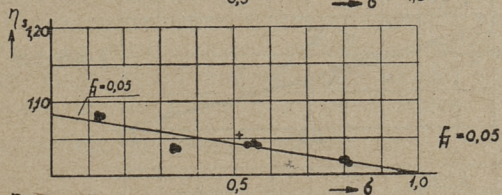
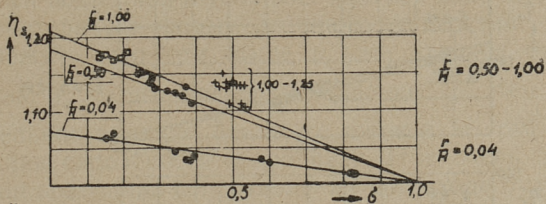
II. ВОДОСЛИВ С НУЛЕВОЙ ВЫСОТОЙ ПОРОГА

1. ВОДОСЛИВ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВХОДНЫМИ РЕБРАМИ

В отношении водослива рассматриваемого типа в нашем распоряжении имеются следующие опытные данные: опыты Д. И. Кумина — 89 точек, опыты М. Д. Чертоусова — 54 точки и опыты А. Р. Березинского — 21 точка.⁶

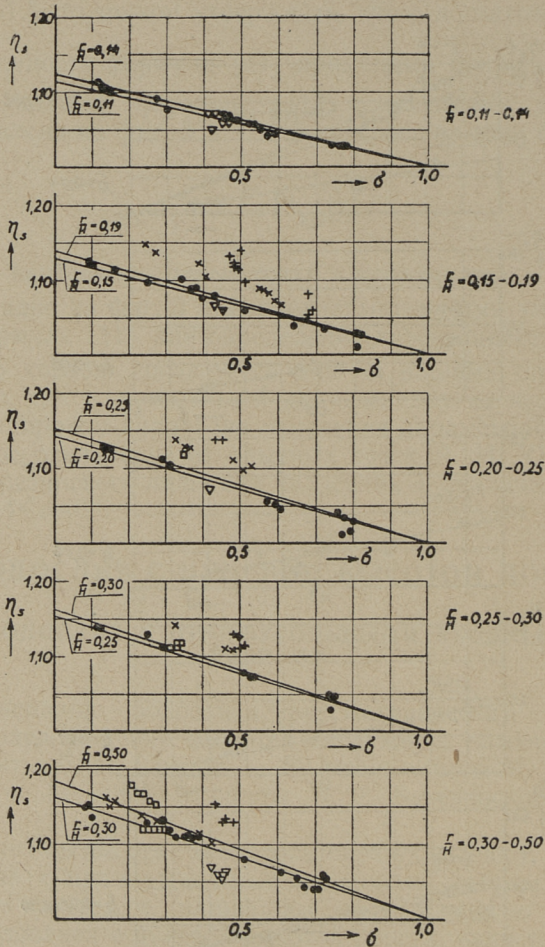
Данные опытов этих исследователей указывают, что при водосливе с прямоугольными входными ребрами единственным фактором, влияющим на пропускную способность водослива с нулевой высотой порога, является относительное сжатие потока в плане, т. е. величина β . Влияние фактора $\frac{H}{b}$ на пропускную способность водослива до сих пор не изучалось. Однако, на наш взгляд отношение $\frac{H}{b}$ является одной из существенных характеристик

⁶ Здесь мы имеем в виду только те опытные точки, для которых отношение $\frac{\delta}{H}$ лежало в пределах $3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8$.



- опыты Базена
- + опыты Кумина
- наши опыты

Фиг. 3.



- опыты Базена
- ▽ опыты Вудборна
- + опыты Кумина
- x опыты Березинского
- наши опыты

Фиг. 4.

входа на водослив (равным образом как и форма входного ребра водослива в условиях плоской задачи), так как оно характеризует форму входного отверстия. Можно предположить, что чем выше и уже входное отверстие водослива, т. е. чем больше отношение $\frac{H}{b}$, тем больше относительное влияние бокового сжатия и тем меньше пропускная способность водослива. При очень широком отверстии водослива сопротивления при входе будут сравнительно незначительные и, следовательно, влияние сжатия потока на пропускную способность водослива будет невелико. Если сопротивления при входе можно объяснить только отрывом струи от обтекаемых поверхностей входных ребер, то будем иметь: при $\frac{H}{b} \rightarrow 0$, т. е. при $b \rightarrow \infty$ $m_0 \rightarrow m_{0 \max}$; наоборот, при $\frac{H}{b} \rightarrow \infty$, т. е. при $H \rightarrow \infty$ $m_0 \rightarrow m_{0 \min}$.

Следует отметить, что экспериментальная проверка этих пределов связана с затруднениями. Но с другой стороны уже наши первые серии опытов показали, что коэффициент расхода водослива m_0 при $\beta = \text{const}$ зависит от относительного напора на водосливе, т. е. от величины $\frac{H}{b}$.

Для установления зависимости коэффициента расхода водослива с нулевой высотой порога от указанных выше факторов, нами проведены детальные систематические экспериментальные исследования, причем отношение $\frac{H}{b}$ в этих опытах изменялись в достаточно широком диапазоне.

Опыты проводились при следующих значениях величины β : 0,87; 0,85; 0,70; 0,60; 0,50; 0,40; 0,30; 0,20; 0,10; 0,095; 0,05.

Группа опытов, при которых $\beta = \text{const}$ составляла одну серию опытов (с переменным отношением $\frac{H}{b}$). Общее количество таких опытных серий было 17, количество же отдельных опытов составляло 355.

Все серии опытов обнаружили, что с увеличением отношения $\frac{H}{b}$ коэффициент расхода водослива m_0 несколько уменьшается.⁷

⁷ То же самое было обнаружено и в последующих опытах при закругленных входных ребрах и при скошенных верхних гранях.

Для определения коэффициента расхода водослива с прямоугольным входом мы считали возможным принять формулу такого вида:

$$m_0 = km_{0t}, \quad (12)$$

где m_{0t} — коэффициент расхода водослива по теоретическому решению М. Д. Чертоусова и

k — коэффициент, учитывающий влияние отношения $\frac{H}{b}$ на величину коэффициента расхода водослива.

Граничными условиями для коэффициента k принимались следующие:

$$k = k_{\max} \quad \text{при} \quad \frac{H}{b} = 0 \quad \text{и при} \quad \beta = 0;$$

$$k = 1,0 \quad \text{при} \quad \frac{H}{b} = 0 \quad \text{и при} \quad \beta = 1;$$

$$k = k_{\min} \quad \text{при} \quad \frac{H}{b} \rightarrow \infty \quad (\text{т. е. при } H \rightarrow \infty)$$

и при $\beta = 1$.

На основании анализа наших опытных данных мы предлагаем для определения коэффициента k такую эмпирическую формулу:

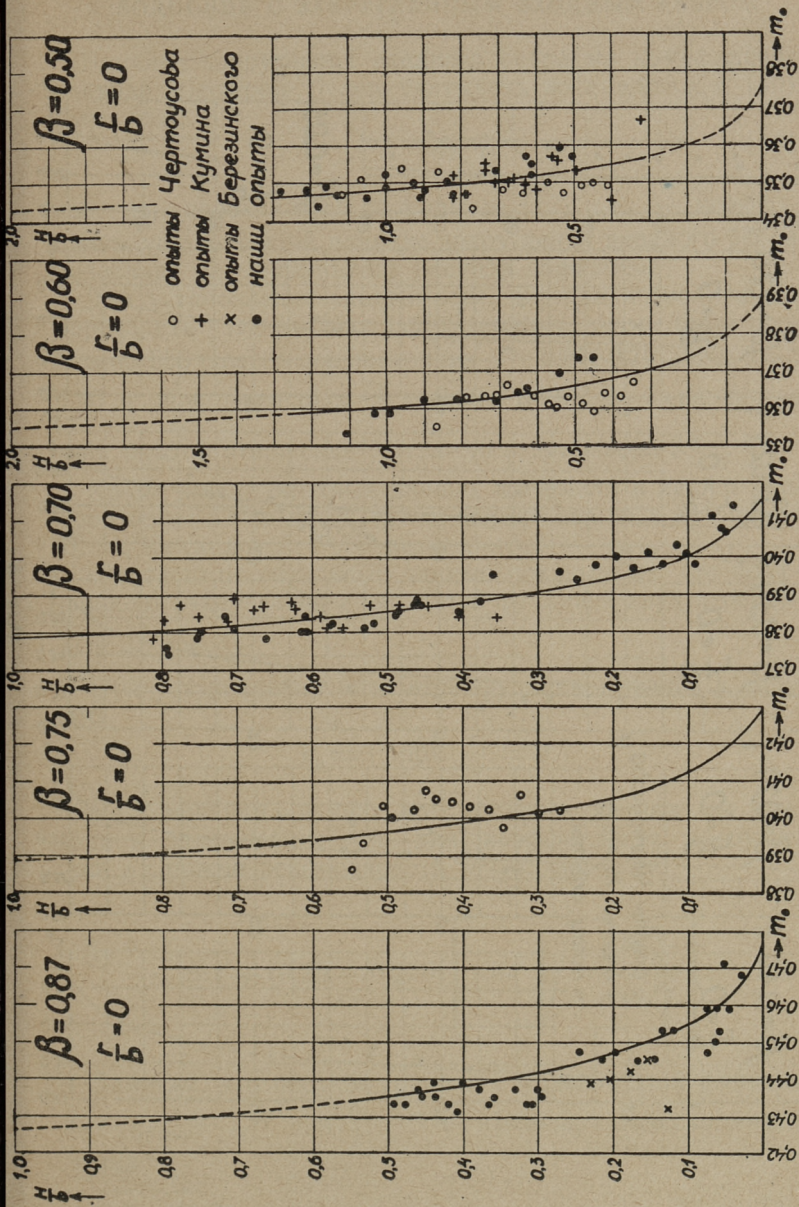
$$k = 1 + 0,10(1 - \beta) - (0,06 + 0,10\beta) \sqrt{\frac{\frac{H}{b}}{1 + \frac{H}{b}}}. \quad (13)$$

Заметим, что эта формула соответствует указанным выше граничным условиям, причем она дает $k_{\max} = 1,10$ и $k_{\min} = 0,84$.

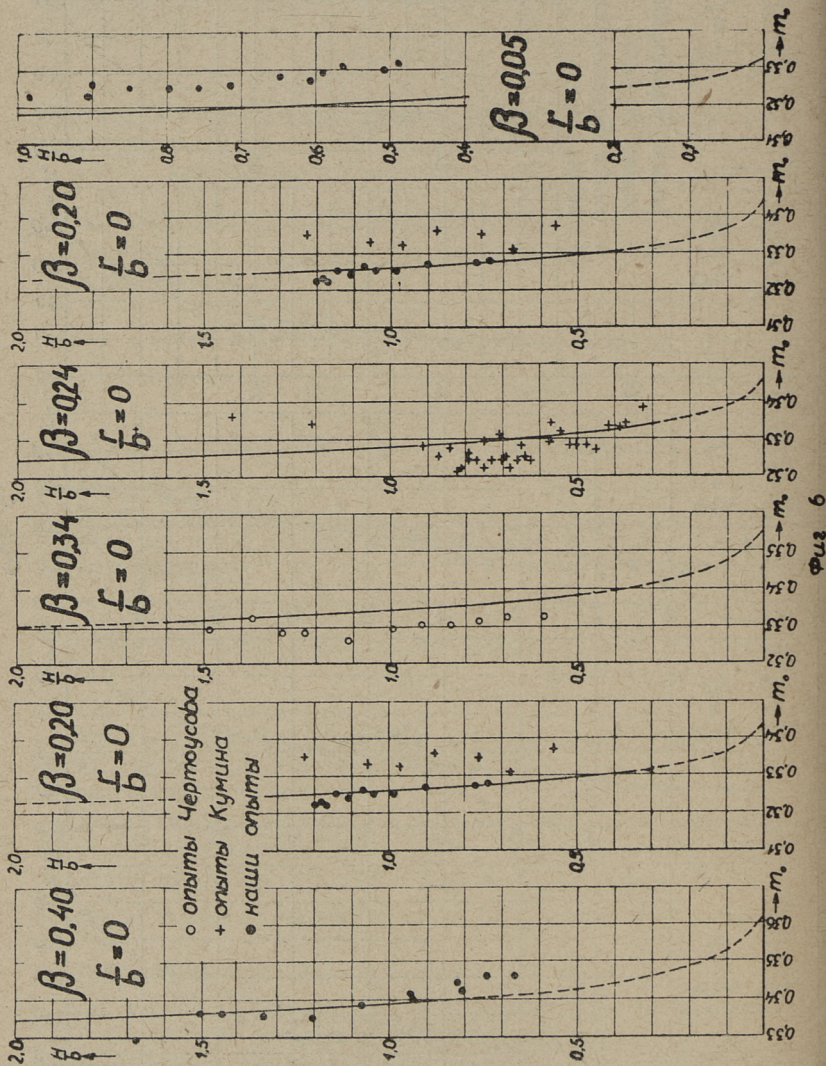
Сопоставление формулы (13) с нашими опытными данными и опытными данными других исследователей представлено на фиг. 5 и 6, где с помощью формулы (13) построены графики функции $m_0 = f\left(\frac{H}{b}\right)$ при $\beta = \text{const}$ и нанесены опытные точки в координатах m_0 и $\frac{H}{b}$.

Как видно из фиг. 5 и 6, предлагаемая нами формула (13) достаточно хорошо согласуется как с нашими опытными данными, так и с опытными данными других исследователей.

Наибольшие отклонения отдельных опытных точек составляет $\pm 3\%$.



Фиг. 5.



2. ВОДОСЛИВ С ЗАКРУГЛЕННЫМ ВХОДНЫМ РЕБРОМ

Влияние закругления входного ребра на коэффициент расхода водослива будем учитывать по аналогии с (10) формулой:

$$m_{0з} = \eta_{\beta} m_0, \quad (14)$$

где m_0 определяется по формуле (12) и η_{β} — коэффициент, учитывающий влияние закругления входного ребра водослива на коэффициент расхода водослива.

Для установления зависимости, которая позволила бы определить коэффициент закругления η_{β} , нами было проведено 658 опытов при значениях $\beta = 0,87; 0,70; 0,60; 0,50; 0,40$ и при значениях $\frac{r_2}{b} = 0,02—1,30$. В большинстве этих опытов отношение $\frac{\delta}{H}$ лежало в диапазоне $3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8$.

Кроме наших опытных данных мы имели в нашем распоряжении 57 опытных точек, заимствованных из опытов Д. И. Кумина и А. Р. Березинского.

Все экспериментальные данные показывают, что коэффициент закругления η_{β} является функцией двух переменных — β и $\frac{r_2}{b}$.

При установлении вида этой функции имелись в виду, что

$$\eta_{\beta} = 1 \quad \text{при} \quad \frac{r_2}{b} = 0.$$

На основании анализа всех опытных данных мы пришли к заключению, что для коэффициента закругления η_{β} можно рекомендовать такую формулу:

$$\eta_{\beta} = 1 + (0,30 - 0,27\beta) \left[1 - \sqrt{\frac{1 + 5 \frac{r_2}{b}}{1 + 30 \frac{r_2}{b}}} \right]. \quad (15)$$

Заметим, что верхнее граничное условие этой функции $\eta_{\beta} = \eta_{\beta \max} = 1,17$ при $\frac{r_2}{b} \rightarrow \infty$ не имеет практического значения.⁸

⁸ см. стр. 9.

Как показывают опытные данные, при увеличении отношения $\frac{r_2}{b}$ интенсивное увеличение коэффициента η_β (при $\beta = \text{const}$ и при $\frac{H}{b} = \text{const}$) происходит в интервале $\frac{r_2}{b} \leq 0,4$. По этой причине мы рекомендуем в практических приложениях применять относительное закругление входных ребер водослива $\frac{r_2}{b} \leq 0,4$. Так как наши опытные точки охватывают область $0 < \frac{r_2}{b} < 1,3$, то можем утверждать, что формула (15) с достаточной степенью точности применима при $\frac{r_2}{b} \leq 1,3$.

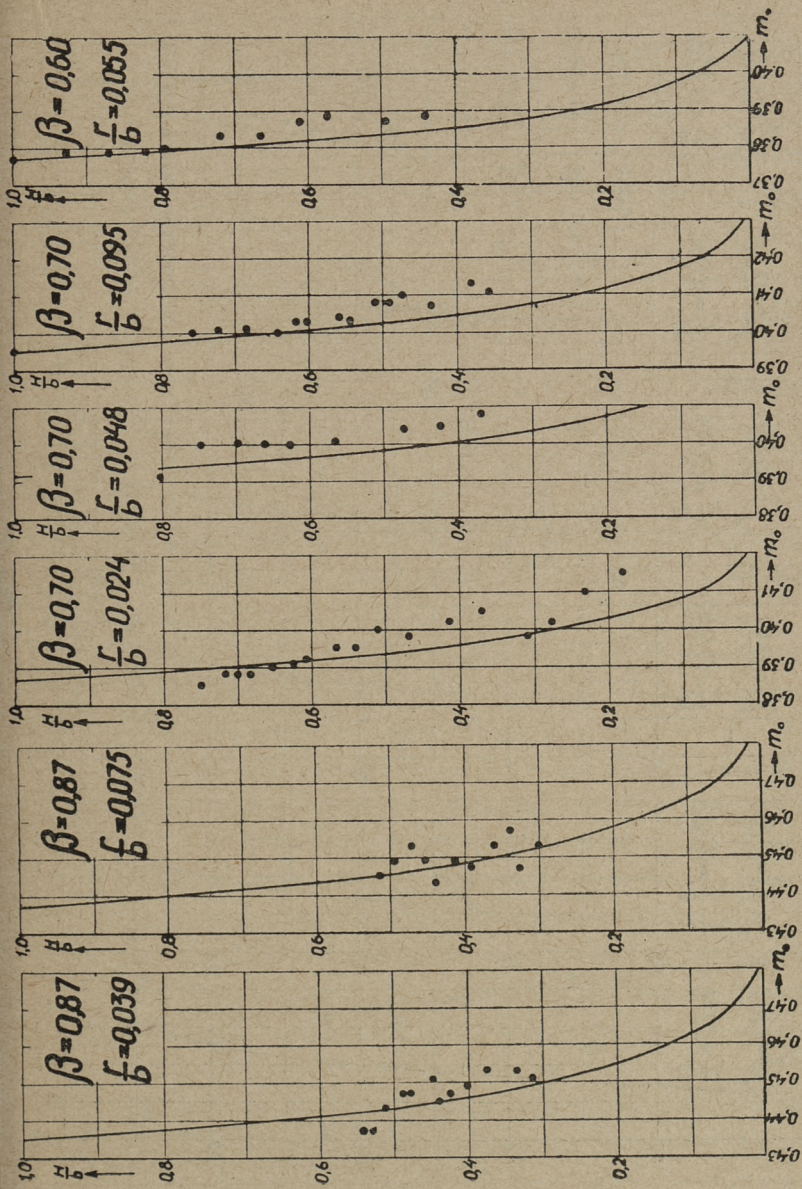
Сопоставление результатов расчета по рекомендуемой нами формуле с опытными данными представлено на фиг. 7, 8 и 9, где с помощью формулы (15) построены графики функции $m_0 = f\left(\frac{H}{b}\right)$ при $\beta = \text{const}$ и $\frac{r_2}{b} = \text{const}$ и нанесены опытные точки в координатах m_0 и $\frac{H}{b}$.

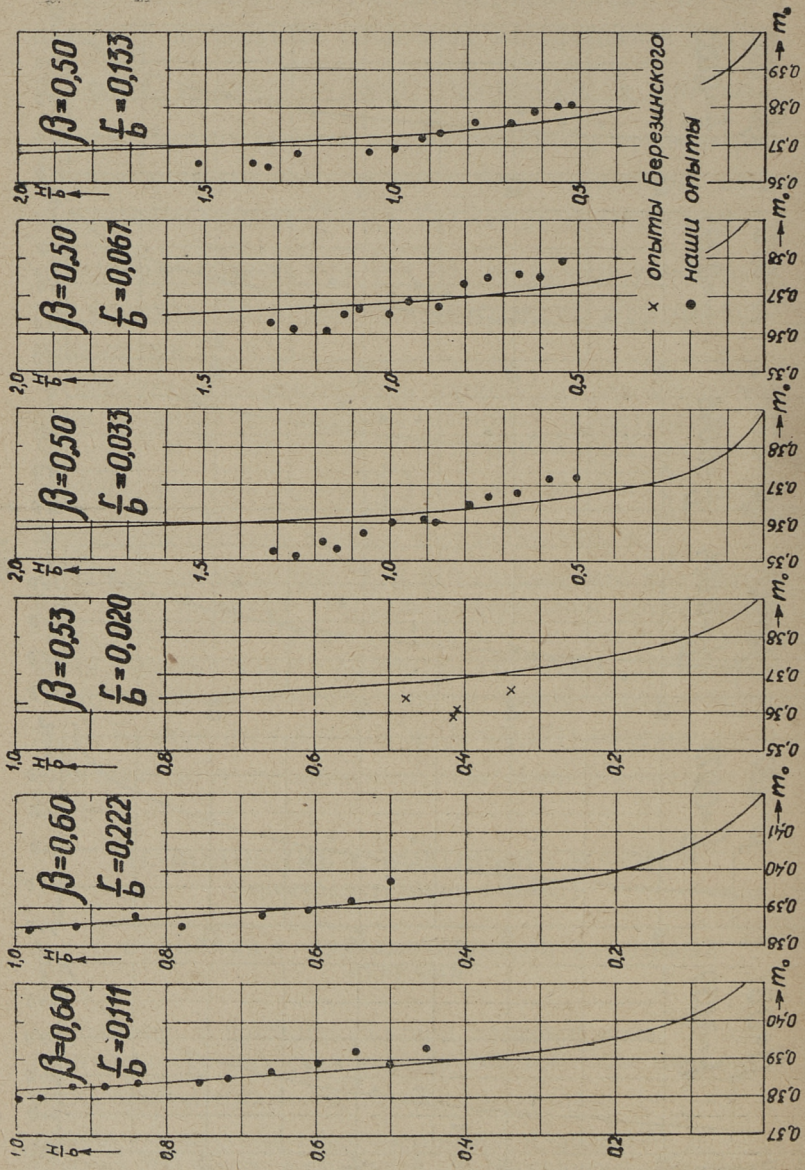
Из рассмотрения фиг. 7, 8 и 9 следует, что предлагаемая нами формула (15) для определения коэффициента η_β достаточно хорошо согласуется как с нашими опытными данными, так и с опытными данными Д. И. Кумина. Следует однако отметить, что в одной серии опытов Д. И. Кумина (при $\beta = 0,24$ и $\frac{r_2}{b} = 0,171$) опытные точки отклоняются от предложенной нами кривой в среднем до 3,5%.

III. ВОДОСЛИВ С БОКОВЫМ СЖАТИЕМ (пространственная задача)

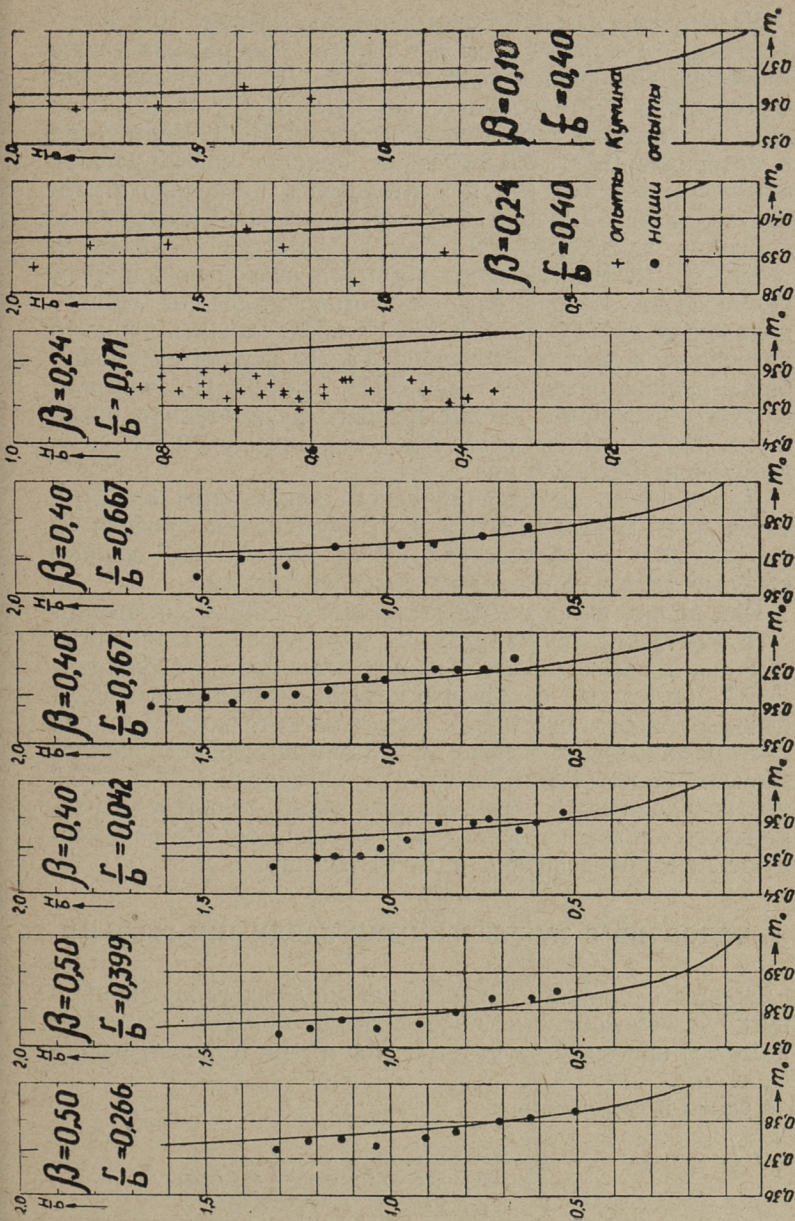
1. ВОДОСЛИВ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВХОДНЫМИ РЕБРАМИ

Водослив с боковым сжатием является пока экспериментально сравнительно мало изученным. Если из общего числа опытов выбрать те опыты, при которых $3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8$, то количество опытных точек составляет: в опытах М. Д. Чертоусова 200 точек, в опытах А. Р. Березинского 38 точек, и в опытах Д. И. Кумина 11 точек.





Фиг. 8.



Фиг. 9.

Указанные опытные точки нанесены на фиг. 10 в координатах σ и m_0 и на этом же чертеже изображена также теоретическая кривая $m_0 = f(\sigma)$ М. Д. Чертоусова, построенная в соответствии с формулами (3) и (5). Как видим из фиг. 10, теоретическая кривая М. Д. Чертоусова в интервале $0,2 < \sigma < 0,8$ весьма хорошо согласуется с опытными точками М. Д. Чертоусова и несколько отклоняется от них лишь при малых значениях параметра σ , лежащих в пределах $0,1 < \sigma < 0,2$. Рассеяние опытных точек А. Р. Березинского весьма значительное, причем целые серии его опытов резко отклоняются от общего положения других точек. Следует предположить какие-то неточности в опытах этих серий. Также, повидимому, ошибочна и серия опытных точек Д. И. Кумина. По этой причине мы устранили из дальнейшего рассмотрения опытные серии 7'', 8'', 10'' и 17'' А. Р. Березинского и все опытные точки Д. И. Кумина.

Для полного оправдания такого исключения опытных точек А. Р. Березинского и Д. И. Кумина мы провели 14 контрольных серий опытов⁹ (всего 156 опытов), данные которых также нанесены на графике фиг. 10.

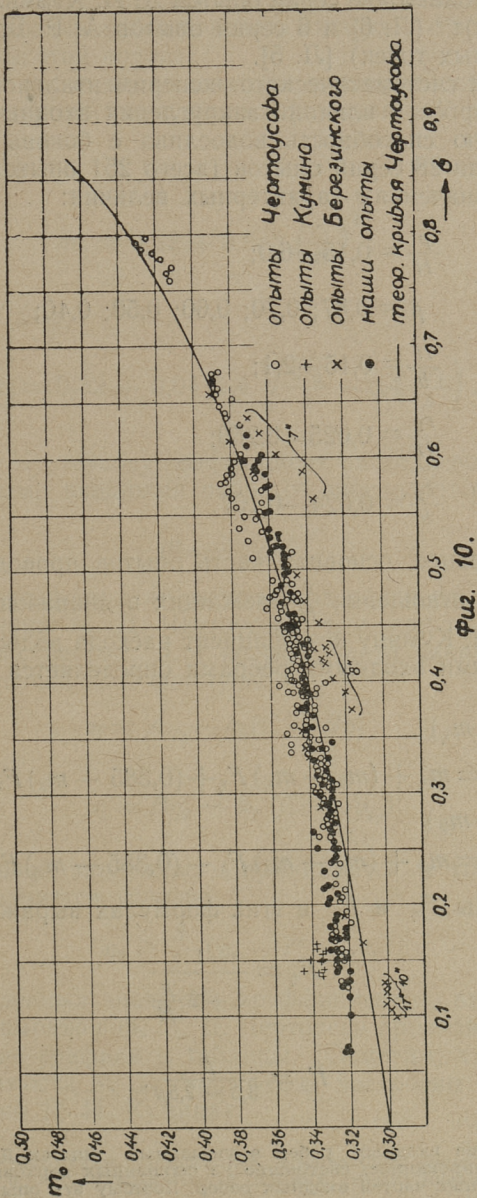
Как видно, наши опытные данные в общем согласуются с опытными данными М. Д. Чертоусова. Таким образом наши опыты полностью подтверждают утверждение М. Д. Чертоусова о том, что коэффициент расхода водослива с боковым сжатием с достаточной точностью можно считать зависящим только от параметра σ , определяемого зависимостью (4), и поэтому в интервале $0,25 < \sigma < 0,8$ нет необходимости отдельно учитывать влияние вертикального и планового стеснения потока, как это рекомендуют А. Р. Березинский и Д. И. Кумин.

2. ВОДОСЛИВ С ЗАКРУГЛЕННЫМИ ВХОДНЫМИ РЕБРАМИ

Вопрос о влиянии закругления входных ребер на пропускную способность водослива с боковым сжатием является наименее изученным. Мы имеем в нашем распо-

⁹ Опыты проводились при

$$\begin{aligned} \frac{P}{H} &= 0,15-6,0 \\ \beta &= 0,87; 0,70; 0,60; 0,50; 0,40; 0,05; \\ \frac{H}{b} &= 0,15-2,1. \end{aligned}$$



ряжении только две серии опытов Д. И. Кумина (22 опытных точек):¹⁰ [Л. 6] и 6 серий опытов А. Р. Березинского (27 опытных точек) [Л. 5].

В целях систематического экспериментального исследования вопроса о влиянии закругления входных ребер на пропускную способность водослива с боковым сжатием мы провели 28 серий опытов (всего 251 опытов) при следующих значениях характерных величин:

$$\frac{p}{H} = 0,15—6,0;$$

$$\beta = 0,87; 0,70; 0,60; 0,50; 0,40;$$

$$\frac{H}{b} = 0,15—2,1;$$

$$\frac{r_1}{H} = 0,025—0,250;$$

$$\frac{r_2}{b} = 0,024—0,167.$$

Как и ранее, основная часть опытов проводилась при значениях отношения $\frac{\delta}{H}$, лежащих в диапазоне $3 \leq \frac{\delta}{H} \leq 8$.

По Д. И. Кумину коэффициент расхода водослива с закругленными входными ребрами определяется по формулам:

(при $m_\beta > m_\gamma$)

$$m = m_\gamma + (m_\beta - m_\gamma) F_\gamma + (0,385 - m_\beta) F_\gamma F_\beta; \quad (16)$$

(при $m_\gamma > m_\beta$)

$$m = m_\beta + (m_\gamma - m_\beta) F_\beta + (0,385 - m_\gamma) F_\gamma F_\beta. \quad (17)$$

Величины F_γ и F_β в этих формулах выражаются так:

$$F_\gamma = \frac{1}{1 + 2 \frac{p}{H}} \quad (18)$$

и

$$F_\beta = \frac{\beta}{3,5 - 2,5\beta}. \quad (19)$$

¹⁰ Очертание входных ребер в указанных опытах Д. И. Кумина было комбинированное, состоящее из скошенных верхних граней и из закругленных частей входных ребер. Поэтому эти опыты в настоящей работе не использованы.

Эти зависимости предложены Д. И. Куминым на основе опытов с водосливом без бокового сжатия и с водосливом с нулевой высотой порога.

Величины m_η и m_β , входящие в зависимости (16) и (17), определяются следующими формулами:¹¹

(при $\frac{r_1}{H} \leq 1$)

$$m_\eta = 0,32 + 0,055 \left(\frac{r_1}{H} \right)^{\frac{1}{4}}; \quad (20)$$

(при $\frac{r_2}{b} \leq 0,50$)

$$m_\beta = 0,32 + 0,04 \left(1,4 \sqrt{\frac{2r_2}{b}} - 0,4 \frac{2r_2}{b} \right). \quad (21)$$

По М. Д. Чертоусову коэффициент расхода водослива с закругленными входными ребрами определяется по формуле:

$$m_{03} = \eta m_{0t},$$

где m_{0t} — коэффициент расхода водослива по теоретическому решению М. Д. Чертоусова, т. е. при прямоугольных входных ребрах. Для коэффициента закругления η М. Д. Чертоусов дает формулы:

$$\eta = A\eta_\beta - k_\beta(C - B\eta_p) \quad (22)$$

и

$$\eta = B\eta_p - k_p(C - A\eta_\beta), \quad (23)$$

причем первая зависимость принимается в том случае, когда выполняется условие

$$\eta_p > \frac{S}{S'} (\eta_\beta - r') + r. \quad (24)$$

Для численных значений коэффициентов, входящих в последние выражения, М. Д. Чертоусов приводит соответствующие графики и таблицы. (Отметим, что указанные зависимости М. Д. Чертоусова построены на основе предложений Д. И. Кумина).

¹¹ По этим формулам, повидимому, определены значения коэффициентов m_η и m_β , указанные в нормах гидравлического расчета водосливов [Л. 4].

Для проверки вышеуказанных формул Д. И. Кумина и М. Д. Чертоусова мы провели их сопоставление с нашими экспериментальными данными.¹² При этом значения коэффициента расхода водослива определялись по опытным данным с помощью формулы:

$$m_0 = \frac{Q}{b \sqrt{2gH^{3/2}}}$$

и затем сопоставлялись с значениями коэффициента m_0 полученными по формулам М. Д. Чертоусова и Д. И. Кумина.

Далее для каждой опытной точки определялись отклонения

$$\Delta m_0 = \frac{m_{0з} - m_0}{m_0} \cdot 100\%$$

Средне-квадратичные отклонения коэффициентов расхода водослива m_0 , определяемые по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta m_0)_i^2}{n}}, \quad (25)$$

получились следующими:

по формулам Чертоусова $\varepsilon = \sim 2,5\%$,
по формулам Кумина $\varepsilon = \sim 2,0\%$.

Подробный анализ¹³ показывает, что формулы Д. И. Кумина и М. Д. Чертоусова дают удовлетворительные результаты при больших значениях β ($\beta \geq 0,6$) и при малых значениях $\frac{p}{H}$ ($\frac{p}{H} \leq 0,5$). При малых значениях β и больших значениях $\frac{p}{H}$ (т. е. при малых значениях σ) вышеуказанные формулы дают отклонения по сравнению с опытными данными до 5%, причем коэффициенты, получен-

¹² Мы используем здесь только наши опытные данные, так как в опубликованных опытных данных А. Р. Березинского [Л. 5] не указываются значения величин $\frac{r_1}{H}$ и $\frac{r_2}{b}$.

¹³ Сопоставление в виде графиков здесь невозможно по причине большого числа переменных.

ные по формулам, всегда меньше коэффициентов, полученных по опытам. Кроме того следует отметить, что применение формул М. Д. Чертоусова является весьма трудоемким. Поэтому мы считаем целесообразным подобрать более простые и более точные эмпирические зависимости для определения коэффициента расхода в рассматриваемом случае, причем в качестве основных положений принимаем следующие.

При водосливе с прямоугольными входными ребрами опытные данные М. Д. Чертоусова, а также и наши опытные данные подтверждают вывод М. Д. Чертоусова, что если одно из стеснений потока достигает максимума, т. е. или $\beta \rightarrow 0$ или $\frac{p}{H} \rightarrow \infty$, то в обоих этих случаях $\sigma = 0$ и, следовательно, $m_0 = m_{0 \min}$, независимо от другого возможного стеснения потока водосливом. Основываясь на этом, в дальнейшем мы распространяем это положение и на закругленные входные ребра.

Если например $\frac{p}{H} \rightarrow \infty$ и $\frac{r_1}{H} = 0$, то преобладающим влиянием является вертикальное стеснение потока, так как влияние стеснения в плане на пропускную способность водослива совершенно отсутствует, независимо от значения β и $\frac{r_2}{b}$. Если же $\frac{p}{H} < \infty$ и $\frac{r_1}{H} > 0$, то на пропускную способность водослива оказывает некоторое влияние также и стеснение потока в плане. При этом пропускная способность водослива определяется тем стеснением, влияние которого доминирует. Вопрос о влиянии одного или другого стеснения потока на пропускную способность водослива является еще более сложным при закругленных входных ребрах. На наш взгляд пропускная способность водослива с боковым сжатием определяется в основном той частью периметра входного отверстия водослива, которая имеет худшие условия входа (либо большое значение $\frac{p}{H}$ или малое значение β , $\frac{r_1}{H}$ или $\frac{r_2}{b}$). Принципиально то же самое утверждает в своей работе и Д. М. Кумин [Л. 3].

В соответствии с вышеуказанными положениями мы рекомендуем для определения коэффициента расхода водослива с боковым сжатием при закругленных входных ребрах такую формулу:

$$m_{03} = \eta m_{0t}, \quad (26)$$

где m_{0t} — коэффициент расхода водослива по теоретическому решению М. Д. Чертоусова (т. е. при прямоугольных входных ребрах).

Коэффициент закругления η определяется одной из следующих формул:

$$\eta = \eta_s + \frac{1}{1 + \frac{p}{H}} (\eta_\beta - 1) \quad (27)$$

(если преобладает влияние стеснения потока в вертикальном направлении), и

$$\eta = \eta_\beta + \beta (\eta_s - 1) \quad (28)$$

(если преобладает влияние стеснения потока в плане).

Из этих двух формул в расчетах следует пользоваться той формулой, которая дает для коэффициента η меньшее значение.

Отметим, что значения коэффициентов η_s и η_β , входящие в формулы (27) и (28), определяется формулами (11) и (15).

Для сопоставления результатов расчета по формулам (27) и (28) с опытными данными мы вычислили значения коэффициента закругления η_s и η_β по формулам (11) и (15), и по формулам (27) и (28) — значения коэффициента η для всех наших опытов. Меньшее из найденных двух значений η и принималось за расчетное значение коэффициента закругления.

Затем определялись значения коэффициента расхода водослива:

$$m_{0з} = \eta_{\text{расч}} m_{0t}$$

и отклонения этих значений коэффициента расхода от опытных значений его:

$$\Delta m_0 = \frac{m_{0з} - m_0}{m_0} 100\%,$$

где m_0 — опытное значение коэффициента расхода водослива.

Из 183 опытных точек, которые были подвергнуты пересчету, около 70% дали отклонение $|\Delta m_0| < 1\%$, причем наибольшее отклонение получилась равным $\Delta m_0 = -2,6\%$. Среднеквадратичное отклонение коэффициента расхода водослива m_0 получилось равным $\varepsilon = \sim 1\%$.

Это убеждает нас в том, что формулы (27) и (28), предлагаемые нами для определения коэффициента закругления η в общем случае весьма хорошо согласуются с экспериментальными данными. Кроме того наши формулы весьма простые и пользование ими связано с минимальной затратой времени, чего нельзя сказать о других вышеупомянутых формулах.

IV. ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ НЕЗАТОПЛЕННОГО ВОДОСЛИВА С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Анализ наших опытных данных, также и опытных данных других исследователей, приводит к следующим выводам и предложениям.

1. Теоретическое решение М. Д. Чертоусова для незатопленного водослива с широким порогом при прямоугольных входных ребрах в диапазоне $0,2 < \sigma < 0,8$ весьма хорошо согласуется с опытными данными всех исследователей как в условиях плоской задачи, так и в условиях пространственной задачи.¹⁴ Поэтому мы рекомендуем пользоваться для определения коэффициента расхода m_0 незатопленного водослива при прямоугольных входных ребрах теоретическими формулами М. Д. Чертоусова (3) и (5).

В целях упрощения определения коэффициента m_0 в конце настоящей работы приводится график $m_{0t} = F_1(\sigma)$ (график I).¹⁵

2. Для определения коэффициента расхода водослива без бокового сжатия при закругленном входном ребре мы рекомендуем формулу

$$m_{0з} = \eta_s m_{0t},$$

¹⁴ В условиях плоской задачи такое же согласование существует и при $\sigma < 0,2$.

¹⁵ График I заимствован нами из книги М. Д. Чертоусова «Специальный курс гидравлики», 1957 г.

где m_{0t} — коэффициент расхода водослива по теоретическому решению М. Д. Чертоусова (график I), а коэффициент закругления η_s определяется по нашей формуле (11).

В целях упрощения определения коэффициента η_s нами построен график $\eta_s = F_2\left(\frac{p}{H}, \frac{r_1}{H}\right)$ (график II).

3. Для определения коэффициента расхода водослива с нулевой высотой порога при прямоугольных входных ребрах мы рекомендуем формулу

$$m_0 = km_{0t},$$

где m_{0t} — коэффициент расхода водослива по теоретическому решению М. Д. Чертоусова (график I), а коэффициент k определяется зависимостью (13).

В целях упрощения определения коэффициента k нами дается график $k = F_3\left(\beta, \frac{H}{b}\right)$ (график III).

4. Для определения коэффициента расхода водослива с нулевой высотой порога при закругленных входных ребрах мы рекомендуем такую формулу:

$$m_{03} = \eta_\beta m_0 = k\eta_\beta m_{0t},$$

где коэффициент η_β определяется нашей зависимостью (15).

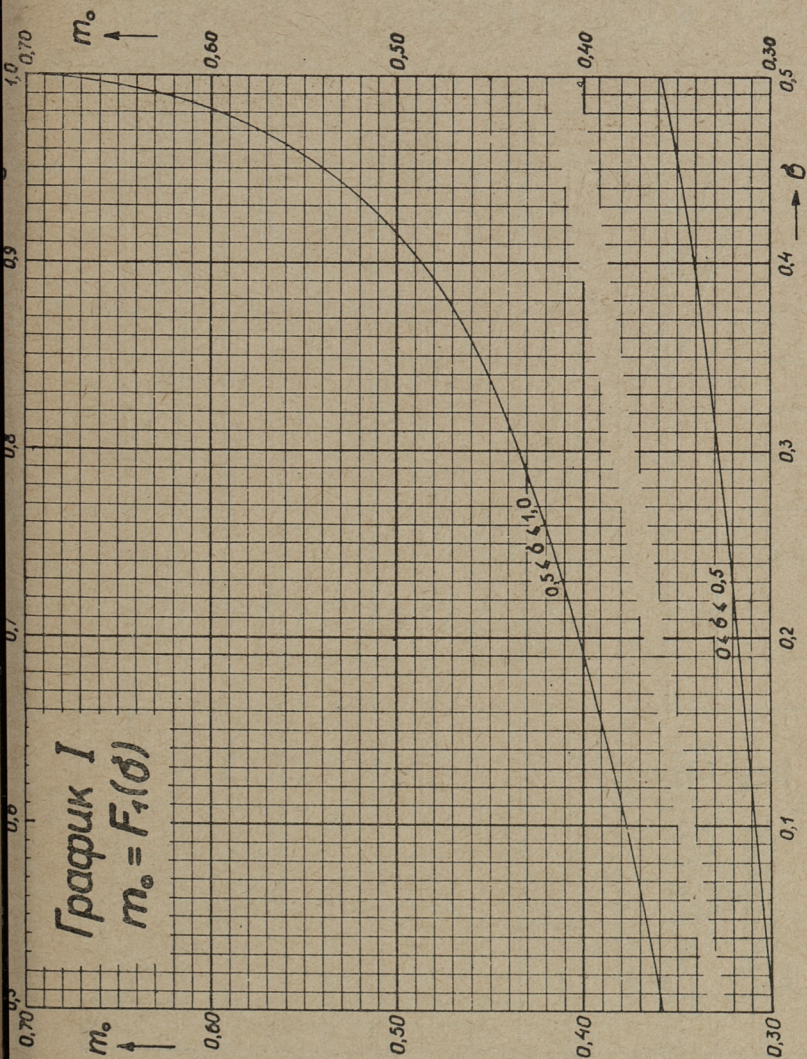
В целях упрощения расчетов по этой формуле ниже дается график $\eta_\beta = F_4\left(\beta, \frac{r_2}{b}\right)$ (график IV).

При этом коэффициент $k = F_3\left(\beta, \frac{H}{b}\right)$ определяется по формуле (13) или по графику III.

5. Для определения коэффициента расхода водослива при закругленных входных ребрах в общем случае, т. е. при плановом и при вертикальном стеснении потока мы рекомендуем такую формулу:

$$m_{03} = \eta m_{0t},$$

где значение коэффициента η определяется по нашим формулам (27) и (28), причем за расчетное значение коэффициента η следует принимать меньшее из двух значений, определяемых формулами (27) и (28).



Фиг. 11.

1,15

График II
 $\eta_s = F_2(\frac{P}{H}, \frac{H}{H})$

η_s

1,10

1,05

$\frac{P}{H} = 1,00$
0,75
0,50
0,40
0,30
0,20
0,15
0,10
0,075
0,050
0,025
0,010
 $\frac{H}{H} = 0,005$

0,5

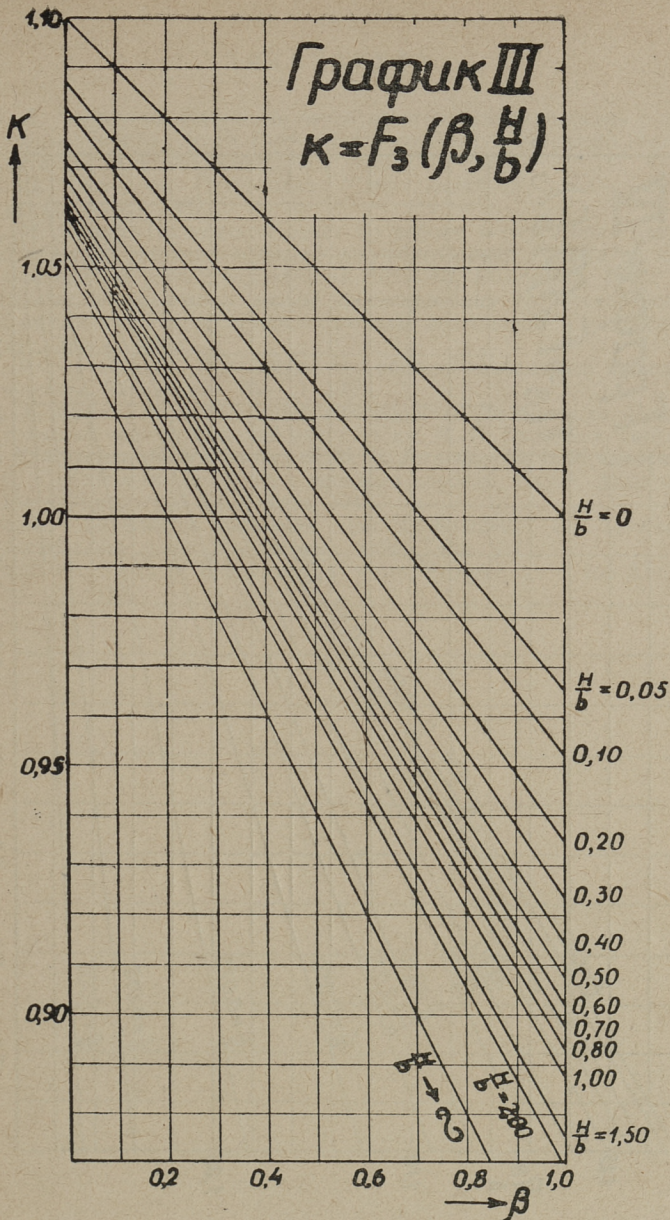
1,0

1,5

2,0

$\frac{P}{H}$

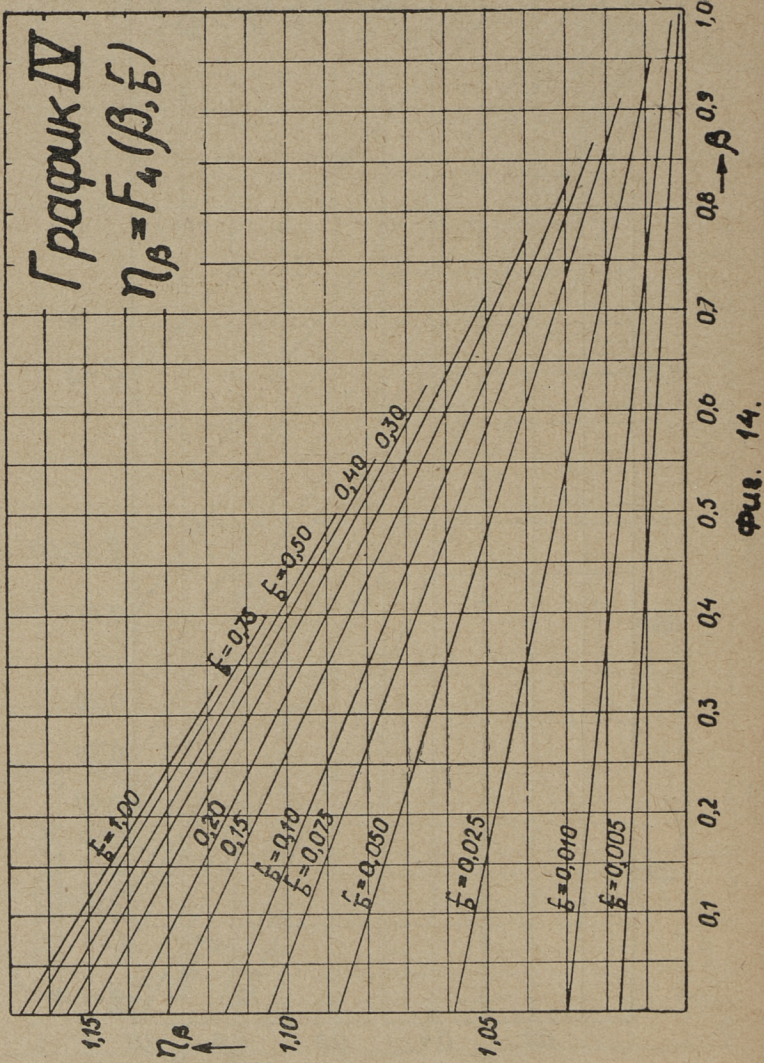
Физ. 12.



Фиг. 13.

График IV

$$\eta_{\beta} = F_4(\beta, \xi)$$



Фиг. 14.

ЛИТЕРАТУРА

1. **М. Д. Чертоусов.** Истечение через незатопленный водослив с широким порогом. Труды Ленинградского Политехнического Института им. М. И. Калинина, № 2, 1956.
 2. **М. Д. Чертоусов.** Гидравлика (Специальный курс). Госэнергоиздат, М.—Л. 1957.
 3. **Д. И. Кумин.** Технический отчет по работе «Углубленная разработка ряда научных вопросов для обоснования ГОСТ'а на гидравлический расчет водосливов». ВНИИГ, Ленинград, 1947.
 4. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Гидравлические расчеты водосливов. Госэнергоиздат, М.—Л. 1952.
 5. **А. Р. Березинский.** Пропускная способность водослива с широким порогом, Стройиздат, М.—Л. 1950.
 6. **Д. И. Кумин.** Водослив с широким порогом. Диссертация. Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина, 1940.
 7. **Г. И. Сухомел, И. Л. Розовский, М. М. Дидковский, В. В. Смыслов, С. Г. Коберник.** Водослив с широким порогом. Издат. Академии Наук Украинской ССР, Киев, 1949.
 8. **Vazin.** Experiences nouvelles sur l'écoulement en déversoir Annales des ponts et chaussées. 1896, Tome XII.
 9. **Woodburn.** Tests of broad-crested weirs. Proceedings of the ASCE, No. 7, 1930.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
I. Водослив без бокового сжатия (плоская задача)	4
II. Водослив с нулевой высотой порога	10
III. Водослив с боковым сжатием (пространственная задача)	18
IV. Выводы и предложения по расчету незатопленного водослива с широким порогом	29
Литература	35

Х. А. Тибар

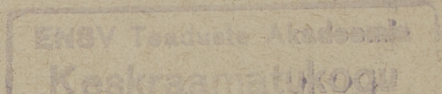
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НЕЗАТОПЛЕННОГО ВОДОСЛИВА С ШИРОКИМ ПороГОМ

*

Редактор Х. Вельнер
Технический редактор А. Тамм
Корректор Э. Нурмет

Сдано в набор 11. VI 1957. Подписано к печати 10. VIII 1957. Бумага 54x84 1/16. Печатных листов 2,25. По формату 60x92 печатных листов 1,85. Учетно-издательских листов 1,58. Тираж 800. МВ-06019. Заказ № 3911.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк 2.
Цена 1 руб. 10 коп.



1 руб. 10 коп.