

Т Р У Д Ы

**СРЕДНЕАЗИАТСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ИРРИГАЦИИ**

Выпуск 56

Инж. А. М. КАГРАМАНОВ

**ВОДОМЕР-АВТОМАТ
С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЩИТОМ**

УЗГОСИЗДАТ

ТАШКЕНТ—1941

Т Р У Д Ы

СРЕДНЕАЗИАТСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ИРРИГАЦИИ

Выпуск 56

Инж. А. М. КАГРАМАНОВ

ВОДОМЕР-АВТОМАТ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЩИТОМ

УЗБЕКСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАШКЕНТ — 1941

I. Введение.

Учет расхода воды на ирригационных системах чрезвычайно важен для правильного и рационального использования имеющихся водных ресурсов.

Закрепление земель за колхозами на вечное пользование и проведение хозрасчета на ирригационных системах требуют правильного и своевременного учета подаваемой воды как по отдельным участкам системы, так и по бригадам, колхозам и совхозам.

Особенно велико значение учета воды для повышения урожайности: недополив может привести к посушке орошаемых культур, а излишний полив — к засолению или заболачиванию земель. Подача воды на орошаемые поля в нужном количестве требует точного определения не только секундного тока воды, но и, главным образом, суммарного расхода воды за время полива.

Существующие способы учета воды по уровню и посредством шлюзов-регуляторов без автоматического регулирования пропускаемого расхода воды далеко не отвечают поставленным требованиям.

Учет воды по уровню, весьма распространенный на больших водотоках (реках, магистральных каналах и др.), на мелкой ирригационной сети широко не применяется. Объясняется это прежде всего тем, что распространить сеть русловых постов на большое количество колхозных отводов и организовать их обслуживание почти не представляется возможным как по экономическим, так и по техническим соображениям.

При периодичности действия канала с переменным расходом для точного определения стока воды требуются или более учащенные замеры или установка многих механических приборов, что сопряжено с дополнительными затратами и необходимостью усиления штата гидрометрических работников. Учет стока воды посредством механических регистраторов-лимниграфов — прием довольно дорогой, сложный и не совсем совершенный. Другие же приборы, более простые и дешевые, пока в практике отсутствуют.

Применяемые для учета воды ирригационные сооружения — водосливы, трубчатые отверстия, лотки Вентури-Паршала, шлюзы-регуляторы — также не дают непосредственного определения

стока (общего количества воды), так как требуют, как и в первом случае, либо учащенных замеров, либо установки дополнительных дорого стоящих механических приборов. В общем установка на каждом колхозном отводе одного сооружения для регулирования (шлюз), второго — для измерения секундного расхода (водосливы, лотки Вентури-Паршала, отверстия и др.), и третьего — для измерения стока воды (лимниграфы и др.) является очень дорогим и в принципе нецелесообразным мероприятием.

В настоящее время основное внимание научных работников и персонала эксплуатационной гидрометрии направлено, с одной стороны, на реконструкцию существующих гидротехнических сооружений в смысле придания им водомерности и на рационализацию эксплуатационной гидрометрии, а с другой — на усовершенствование и разработку таких приборов и сооружений*, которые позволяют одновременно с регулировкой просто, быстро и точно определять как секунднй, так и суммарный расход воды.

Эти задачи могут быть разрешены либо разработкой простого и недорого стоящего механического прибора (счетчика расхода и стока воды) в сочетании с элементарным водомерным сооружением, либо выработкой такого водомерного сооружения, которое непосредственно, без механических приборов, показывало бы расход и сток воды.

Таким сооружением явится водомер-автомат, который должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) обеспечивать пропуск постоянного расхода воды в выпуск, независимо от изменяющихся напоров воды в распределителе;
- 2) одновременно быть шлюзом-регулятором, т. е. позволять регулировать расход водомера;
- 3) не препятствовать свободному транспортированию наносов из распределителя в ороситель;
- 4) иметь простую, достаточно прочную и дешевую в изготовлении конструкцию.

По литературным данным, различными авторами предложены следующие типы водомеров-автоматов:

- 1) водомеры-автоматы с постоянными напором, площадью отверстия и коэффициентом расхода (например сифонный тип, Линдлея и др.);
- 2) водомеры-автоматы с возрастающими сопротивлениями (при увеличении напора воды), т. е. с коэффициентами расхода, изменяющимися пропорционально корню квадратному из напора (например Джибба, Альфа, Бредиса и др.);
- 3) водомеры-автоматы с изменением рабочего отверстия обратно пропорционально корню квадратному из напора (например Ривера, Бредиса, Линдлея и др.).

* В иностранной литературе встречаются указания о наличии сооружения, совмещающего регулировку с учетом. Надо заметить, однако, что эти сооружения не получили широкого практического применения.

Отметим, что до настоящего времени ни один из перечисленных выше водомеров-автоматов не получил практического применения на ирригационных каналах.

Причинами, препятствующими внедрению в производство водомеров-автоматов с постоянным расходом, являются:

- 1) отсутствие достаточных расчетных данных;
- 2) недостаточная разработанность предложенных конструкций;
- 3) сложность и непрактичность отдельных частей их и механизмов;

4) ограниченность условий применения и невысокая точность результатов, т. е. отсутствие полного автоматизма.

Учитывая ценность автоматов, как водомеров, позволяющих определять секундный расход воды и сток воды в ирригационных каналах без специальных механических счетчиков, дополнительного оборудования и пр., автор совместно с инж. М. В. Бутыриным предложили в 1957 г. водомер-автомат с вращающимся на горизонтальной оси плоским щитом.

Данный водомер-автомат в 1937 и 1938 гг. был исследован автором в Лаборатории ирригационных сооружений Санири, и в настоящее время результаты этих исследований публикуются для широкого ознакомления и применения в производственных условиях.

II. Принцип действия водомера-автомата с вращающимся щитом и порядок расчета.

1. Принцип действия.

При изменяющихся горизонтах воды в верхнем бьефе (распределителе) пропуск постоянного расхода воды в ороситель (выпуск) достигается за счет автоматического регулирования рабочего отверстия выпуска. Осуществляется это с помощью плоского щита, вращающегося на горизонтальной оси, и порога специальной формы, установленного на дне выпуска (рис. 1).

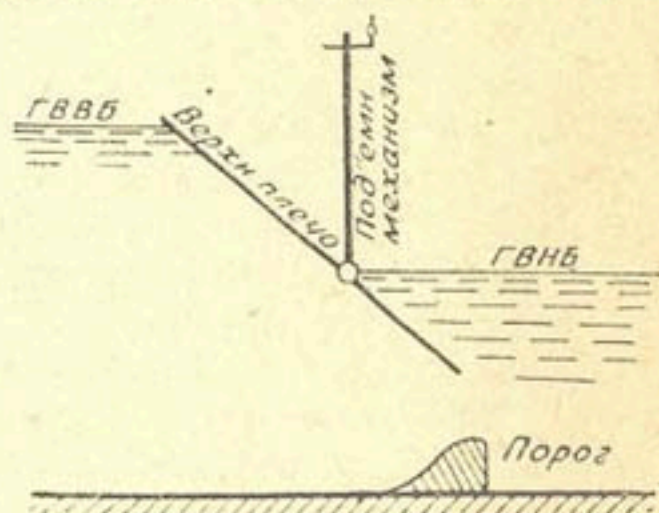


Рис. 1. Схема автомата.

2. Расчет размеров щита.

Для достижения равновесия свободно-вращающегося плоского щита, установленного на горизонтальной оси, при соответствующих горизонтах воды в верхнем и нижнем бьефах выпуска, необходимо, чтобы сумма моментов всех сил, действующих на

верхние и нижние плечи щита относительно его оси вращения, равнялась нулю, т. е. необходимо, чтобы:

$$P_v \cdot Y_v = P_n Y_n \quad (1)$$

где P_v, P_n — величины гидростатического давления, приходящиеся на верхнее и нижнее плечи щита;

Y_v, Y_n — расстояние от оси вращения щита до точек приложения сил (рис. 2).

Из формулы (1) нетрудно видеть, что от изменения горизонтов воды в нижнем и верхнем бьефах будут изменяться и значения P и Y .

В работе щита могут быть два характерные случая:

1) истечение из-под щита затопленное, т. е. горизонты воды в нижнем бьефе выпуска всегда выше нижней кромки щита;

2) истечение из-под щита свободное, т. е. щит не затоплен.

Свободное истечение воды из-под щита дает худшую работу автомата, чем при затопленном отверстии. Но так как при определении размеров плеч могут иметь место оба случая, мы и займемся их исследованием.

Случай I.

Истечение из-под затопленного щита (горизонты воды в нижнем бьефе всегда выше оси вращения щита).

А. Вывод формулы для определения размеров щита при его вертикальном положении.

Гидростатическое давление, приходящееся на верхнее плечо, согласно рис. 2 (а и б) равно:

$$P_v = \gamma b \frac{l_v + \eta l_v}{2} (l_v - \eta l_v) = \gamma b \frac{l_v^2}{2} (1 - \eta^2) \quad (2)$$

где: l_v — длина верхнего плеча щита,

l_n — длина нижнего плеча щита,

η — коэффициент затопления струи над осью вращения щита,

γ — удельный вес воды,

b — ширина щита.

Коэффициент η может изменяться от нуля до единицы. При $\eta = 0$ горизонты воды в нижнем бьефе находятся на оси вращения щита, а при $\eta = 1,0$ — на уровне верхней кромки щита. Центр давления силы P_v от оси вращения будет находиться на расстоянии

$$Y_v = \frac{l_v^3 - \eta^3 l_v^3}{3(l_v^2 - \eta^2 l_v^2)} = \frac{l_v^3(1 - \eta^3)}{3l_v^2(1 - \eta^2)} = \frac{1}{3} \left(\frac{1 - \eta^3}{1 - \eta^2} \right) l_v \quad (3)$$

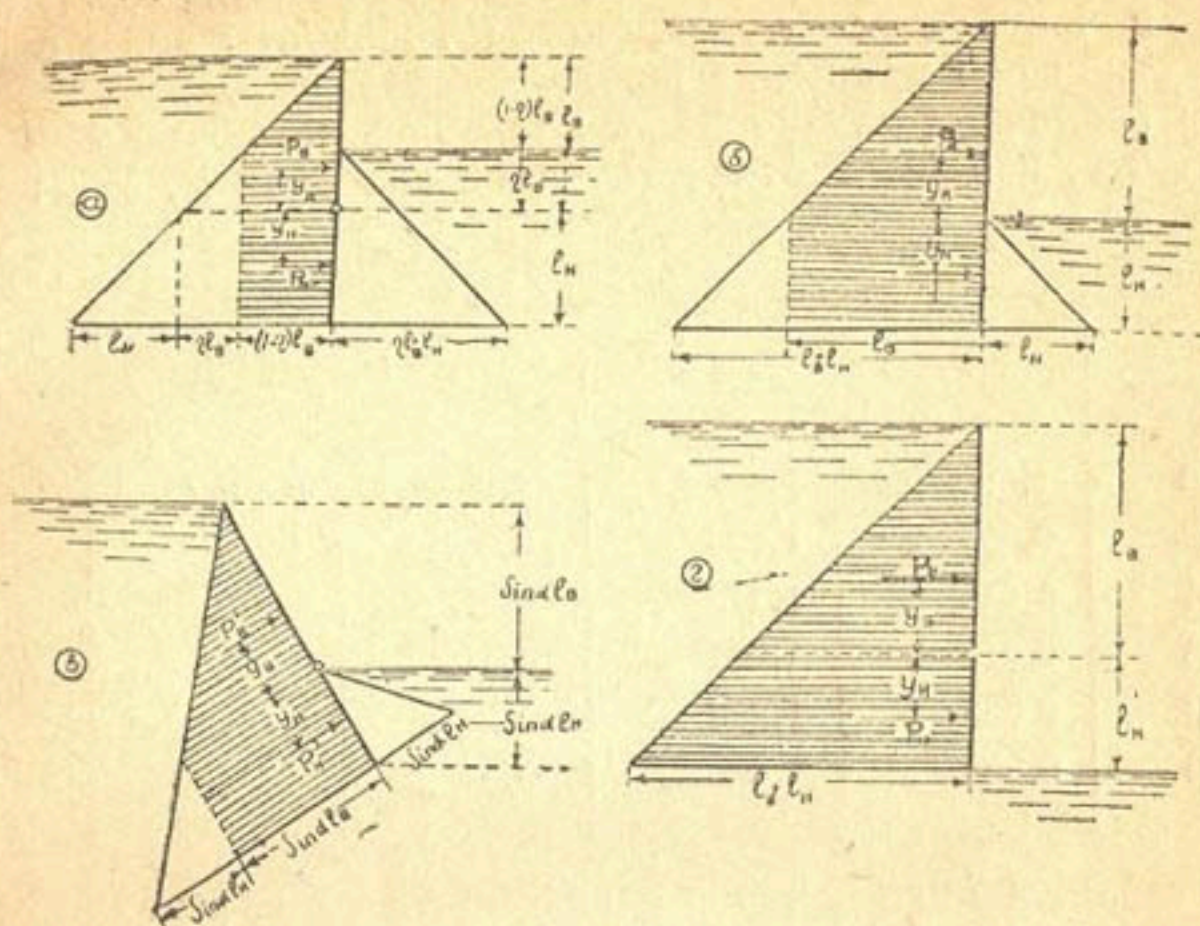


Рис. 2. Эпюры давлений на щит.

Гидростатическое давление, приходящееся на нижнее плечо, выразится в:

$$P_n = \gamma b l_n (l_v - \eta l_v) = \gamma b l_n (1 - \eta) \quad (4)$$

Центр давления силы P_n при этом будет находиться на расстоянии

$$Y_n = \frac{1}{2} l_n \quad (5)$$

Пренебрегая весом щита (считая его в рабочем положении уравновешенным) и подставляя найденные значения P и Y из формул 2, 3, 4 и 5 в уравнение 1, найдем размеры щита

$$\gamma b \frac{1}{2} l_v^2 (1 - \eta^2) \frac{1}{3} \left(\frac{1 - \eta^3}{1 - \eta^2} \right) l_n = \gamma \frac{1}{2} (1 - \eta) l_n^2 l_v b$$

или, сокращая одинаковые величины справа и слева, получим:

$$\frac{1}{3} (1 - \eta^3) l_v^2 = (1 - \eta) l_n^2$$

или:

$$l_v^2 = 3 \left(\frac{1 - \eta}{1 - \eta^3} \right) l_n^2 \text{ или } l_v^2 = \frac{3}{1 + \eta + \eta^2} l_n^2$$

или:

$$l_v = \sqrt{\frac{3}{1 + \eta + \eta^2}} l_n. \quad (6)$$

Таким образом, мы получили общую формулу для расчета размеров щита для случая, когда горизонты воды в нижнем бьефе выше оси вращения щита.

Для различных значений η , пользуясь полученными формулами 2 и 6, найдем соответствующие значения P , Y , l :

Таблица 1

η	P_n	Y_n	P_n	Y_n	l_n/l_n
0,0	$1,000^{1/2} \gamma b l_n^2$	$1,000^{1/3} l_n$	$1,0 \gamma b l_n l_n$	$^{1/2} l_n$	1,735
0,2	0,996 "	1,035 "	0,8 "	"	1,550
0,4	0,640 "	1,115 "	0,6 "	"	1,380
0,6	0,640 "	1,225 "	0,4 "	"	1,240
0,8	0,360 "	1,360 "	0,2 "	"	1,100
1,0	0,000 "	∞ "	0,0 "	"	1,000

Из таблицы видно, что в зависимости от изменения горизонтов воды в выпуске (от уровня оси вращения щита до верхней кромки) отношение l_n/l_n изменяется от 1,735 до 1,0.

Б. Вывод формулы для определения размеров щита при наклонном положении.

При наклоне щита под углом α давление на верхнее плечо может быть выражено через его горизонтальную проекцию (см. рис. 2 б) по уравнению:

$$P'_n = \frac{P_n}{\sin \alpha} \quad (7)$$

где P'_n есть полное давление на верхнее плечо.

P_n — горизонтальная проекция силы P'_n .

Таким же образом плечо, воспринимающее общее давление, может быть выражено через его проекцию на вертикальную ось, равную плечу при вертикальном положении щита Y_n по уравнению

$$Y'_n = \frac{Y_n}{\sin \alpha} \quad (8)$$

Аналогично для нижнего плеча имеем:

$$P'_n = \frac{P_n}{\sin \alpha} \quad (9)$$

$$Y'_n = \frac{Y_n}{\sin \alpha} \quad (10)$$

где P_n и Y_n — полное давление и плечо при вертикальном положении щита.

Беря условие равновесия в форме равенства моментов, имеем:

$$P'_v Y'_v - P'_n Y'_n = 0 \quad (11)$$

или, подставляя полученные значения P' , Y' , имеем:

$$\frac{P_v Y_v}{\sin^2 \alpha} - \frac{P_n Y_n}{\sin^2 \alpha} = 0 \quad (11-a)$$

Или сокращая на $\sin^2 \alpha$ и разделяя переменные, получим:

$$P_v Y_v = P_n Y_n \quad (12)$$

Уравнение (12) показывает, что основное уравнение (1) равновесия щита, независимо от его положения, остается постоянным, и, следовательно, формула для определения размеров щита (6) для всех случаев положения горизонтов воды в нижнем бьефе и всех положений (наклонов) щита остается в силе.

Случай II.

Истечение из-под щита свободное (щит не затоплен).

Вывод формулы расчета размеров щита для второго случая производим только для вертикального положения щита, так как наклон его, как показано в первом случае, не изменяет конечного результата формулы.

Гидростатическое давление, приходящееся на верхнее плечо, будет (см. рис. 22):

$$P_v = \gamma b l_v \frac{1}{2} l_v. \quad (13)$$

Центр давления силы P_v относительно оси вращения щита будет:

$$Y_v = \frac{1}{3} l_v \quad (14)$$

Гидростатическое давление, приходящееся на нижнее плечо, будет:

$$P_n = \gamma b \frac{1}{2} [l_v + (l_v + l_n)] l_n = \frac{1}{2} \gamma b l_n (2l_v + l_n) \quad (15)$$

Центр давления силы l_n относительно оси вращения щита расположен на расстоянии

$$Y_n = \frac{1}{3} l_n \frac{2(l_v + l_n) + l_v}{l_n + l_v + l_v} = \frac{1}{3} l_n \frac{3l_v + 2l_n}{2l_v + l_n} \quad (16)$$

Теперь, составляя уравнение моментов, получим:

$$\gamma b l_v^2 \cdot \frac{1}{3} l_v = \gamma b l_n \frac{1}{3} \left(\frac{2l_v + l_n}{2} \cdot \frac{3l_v + 2l_n}{2l_v + l_n} \right)$$

или:

$$l_v^3 = l_n^2 (3l_v + 2l_n)$$

или:

$$l_v^3 = 3l_n^2 l_v + 2l_n^3 \quad (17)$$

Уравнение 17 может быть упрощено путем разложения на множителей и сокращения одноименных членов; сделав это, получаем в окончательном виде

$$l_v = 2l_n \quad (18)$$

Из формул 6 и 18 видно, что отношение размеров плеч, в зависимости от горизонтов воды в нижнем бьефе выпуска, может изменяться в пределах от единицы до двух.

3. Расчет порога автомата.

Расчет порога автомата производим на случай затопленного отверстия с уровнем воды в нижнем бьефе, постоянно находящимся на оси вращения щита.

Обычная формула затопленного отверстия имеет вид:

$$Q = \mu_0 b h_{ш} \sqrt{2gz_0} \quad (19)$$

где b — ширина щитового отверстия,
 $h_{ш}$ — открытие щита по вертикали,

z_0 — разность напоров,

$$z_0 = \left(H_v + \frac{v_0^2}{2g} \right) - H_n.$$

Q — расход автомата,
 μ_0 — коэффициент расхода.

Выражая величину перепада z_0 через угол поворота щита (см. рис. 3), получим:

$$Z_0 = l_v \sin \alpha \quad (20)$$

Подставляя в формулу 19 значение z_0 из ф-лы 20, получим:

$$Q = \mu_0 b h_{ш} \sqrt{2gl_v \sin \alpha} \quad (21)$$

или обозначая через

$$M = b \sqrt{2gl_v} \quad (22)$$

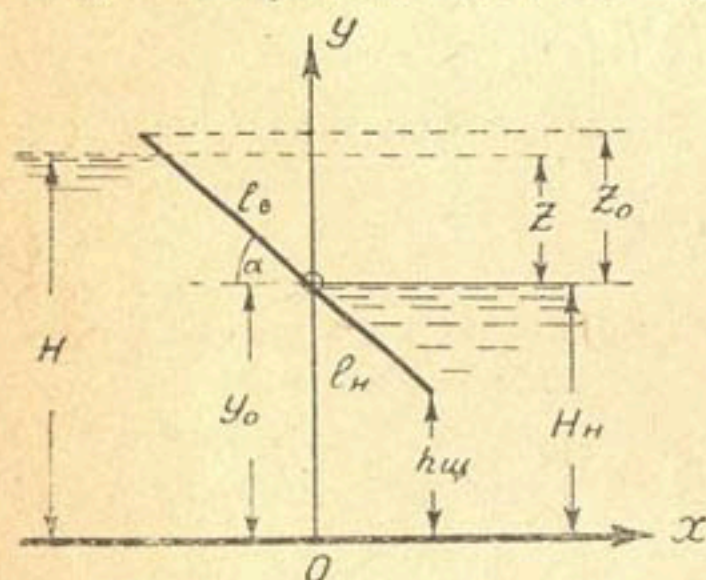


Рис. 3.

$$N = \mu_0 \sqrt{\sin \alpha} \quad (23)$$

вместо ф-лы 21 получим:

$$Q = M \cdot N \cdot h_m \quad (24)$$

Необходимо заметить, что с уменьшением угла α коэффициент расхода μ_0 возрастает, т. е. μ_0 и α — величины, обратно пропорциональные.

В самом деле, известно, что при истечении из-под щита (затопленное отверстие) коэффициент расхода примерно составляет около $\mu = 0,60$ (в этом случае $\alpha = 90^\circ$), а при горизонтальном положении щита, т. е. при $\alpha = 0$, коэффициент расхода в силу отсутствия сжатия будет значительно больше и в пределе может достигнуть единицы.

Однако, проведенные нами предварительные опыты (см. табл. 13) показали, что принятие в формуле 21 коэффициента расхода $\mu = \text{Const} = 0,70$, дает небольшие расхождения по сравнению с точным решением; поэтому нами параллельно с исследованием моделей, построенных на принципе точного решения (т. е. переменного μ), проводились исследования модели, построенной на принципе $\mu = \text{Const}$.

С теоретической точки зрения наибольший интерес представляет нахождение закона изменения коэффициента расхода μ в зависимости от изменения угла в пределах от $\alpha = 0$ до $\alpha = 90^\circ$.

Для случая плоского дна выпуска и свободного истечения воды из-под щита, закон изменения коэффициента расхода μ от α дается в работе Коха и Карстаньена „Основы практической гидродинамики“.

Кох и Карстаньен для вывода формулы μ делают следующее предположение: струи, идущие параллельно дну со скоростью v_0 , подходя к отверстию, искривляются, чтобы в самом отверстии двигаться в радиальном направлении. Очевидно, с изменением направления струек и подхода их к отверстию скорость воды будет увеличиваться. С изменением направления струек внутри потока возникают дополнительные силы K , действующие на поверхность цилиндра AB с радиусом r . К силам K прибавляются новые силы, а именно: собственный вес жидкости G и реакция дна, которые и меняют направление струй воды из радиального в горизонтальное. Кроме этих сил, на щитовое отверстие действует еще давление W .

Учитывая действие всех сил K , v , G и W , Кох и Карстаньен выводят следующий закон:

Движущая сила D давления воды относится к отклоняющей течение части $z = W - D$, как сила K , действующая в направлении течения, относится к отклоняющей течение силе $v - G$, т. е.

$$D = \frac{K}{K + v - G} \cdot W \quad (25)$$

Для нахождения значений всех сил, входящих в формулу 25, сначала предположим отверстие АС закрытым, тогда напор перед щитом будет (см. рис. 4):

$$H_0 = H + S = H + \frac{v_0^2}{2g} \quad (26)$$

и сумма давлений K , действующих на поверхность цилиндра АВ при $b = 1$ м и $\gamma = 1$, будет:

$$dK = rd\varphi(H_0 - r \sin \varphi) \quad (27)$$

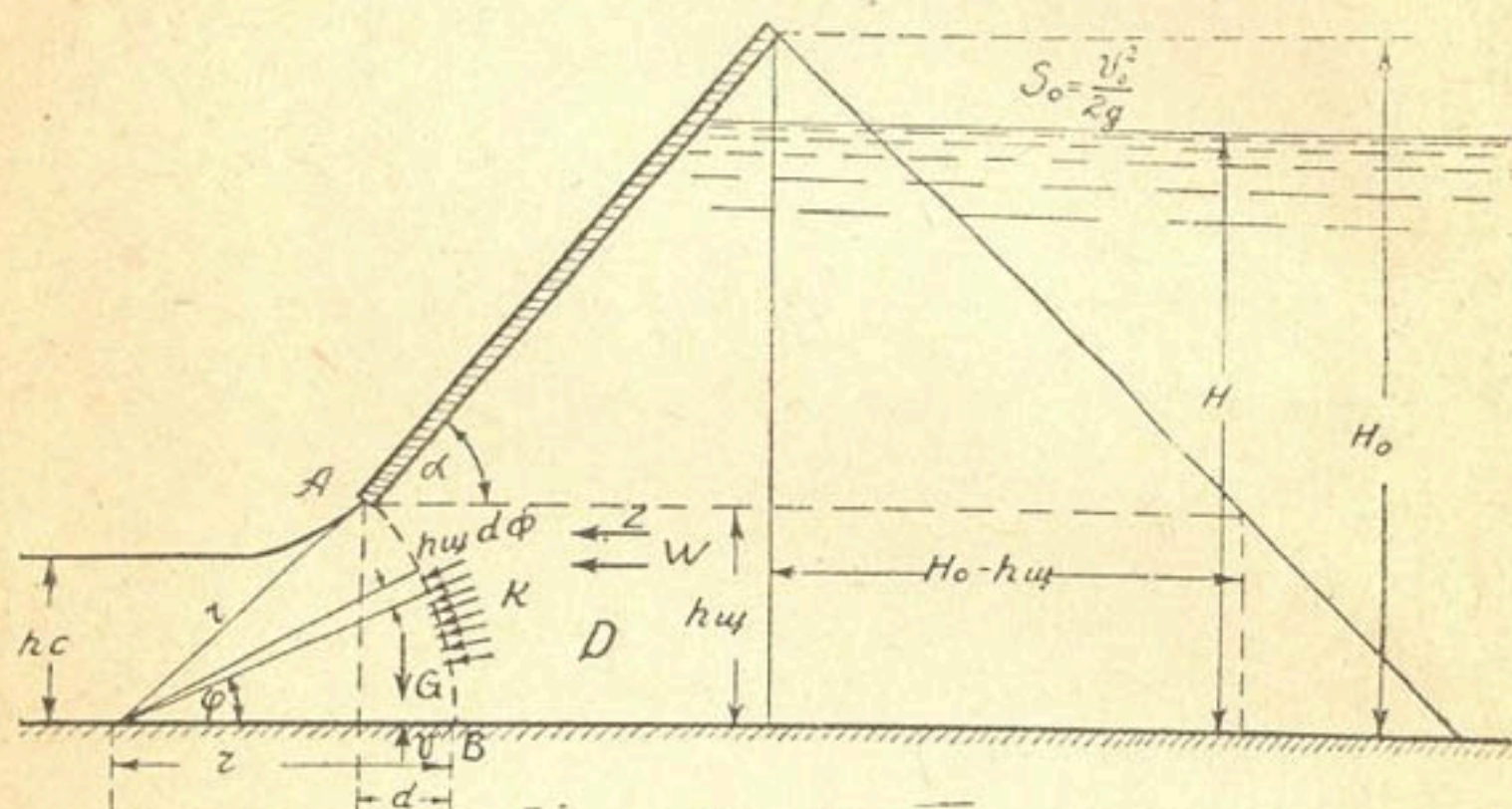


Рис. 4.

где

$$r = \frac{h_m}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad d = r(1 - \cos \alpha)$$

или, интегрируя от 0 до α , получим:

$$\begin{aligned} K &= r \int_0^\alpha (H_0 - r \sin \varphi) d\varphi = r [H_0 \varphi + r \cos \varphi]_0^\alpha = \\ &= r [H_0 \alpha - r(1 - \cos \alpha)] \end{aligned} \quad (28)$$

Давление дна

$$v = H_0 d = H_0 r (1 - \cos \alpha) = h_m H_0 \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (29)$$

Вес жидкости G будет равен:

$$G = \int_0^\alpha \frac{r}{2} r d\varphi - \frac{1}{2} (r \cos \alpha h_m) = \frac{r^2}{2} \alpha - \frac{r}{2} h_m \cos \alpha =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{h_m}{\sin \alpha} \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} - \cos \alpha \right) \quad (30)$$

Давление на отверстие будет равно:

$$W = \frac{(H_0 - h_m) + H_0}{2} \cdot h_m = \frac{1}{2} h_m (2H_0 - h_m) \quad (31)$$

Давление W можно разложить на две части — на давление D , действующее в сжатом сечении $h_c = \mu h_m$, и на давление z , которое уравнивается действием центробежных сил, возникающих при искривлении вытекающих струй

$$D = \frac{1}{2} h_c (2H_0 - h_c) \quad \text{и} \quad D + z = W \quad (32)$$

Теперь, подставляя найденное значение всех сил в основную формулу 25 и, при соответствующих алгебраических преобразованиях, вводя обозначения

$$\frac{h_c}{h_m} = \mu; \quad \frac{H_0}{h_m} = n; \quad \frac{h_c}{H_0} = \frac{\mu}{n}$$

в конечном счете получим:

$$M = \frac{\left(\alpha - \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{n} \right) \left(2 - \frac{1}{n} \right)}{\left(2 - \frac{\mu}{n} \right) \left\{ (1 + \alpha - \cos \alpha) - \frac{1}{n} \left[\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} - \cos \alpha \right) \right] \right\}} \quad (33)$$

При очень больших напорах и малых открытиях щита, считая $\frac{1}{n} \approx 0$, вместо ф-лы 33 имеем:

$$\mu = \frac{\alpha}{1 + \alpha - \cos \alpha} \quad (34)$$

Из этой формулы видно, что при $\alpha = 0$ $\mu = 1$, а при $\alpha = 90^\circ$ $\mu = 0,611$.

Наконец, вводя в формулу 34 поправочный коэффициент на затопленность отверстия и переходя от идеальной жидкости к реальной, вместо формулы 34 будем иметь:

$$\mu_0 = \beta \frac{\alpha}{1 + \alpha - \cos \alpha} \quad (35)$$

Для данного автомата, считая закон изменения коэффициента расхода по формуле 35 и подставляя его значение в основную формулу расхода 21, в окончательном виде получим:

$$Q = b\sqrt{2gl_0} \frac{\beta \alpha}{1 + \alpha - \cos \alpha} \sqrt{\sin \alpha} h_{\text{ш}} = MNh_{\text{ш}}. \quad (36)$$

Как указано выше, назначением сооружения является автоматический пропуск постоянного расхода воды из распределителя в ороситель, а это означает, что для всех случаев работы автомата, при заданном положении оси вращения щита и размерах последнего, произведение M , N и $h_{\text{ш}}$ в формуле 36 всегда должно быть постоянным.

Из формулы 36 видно, что при работе автомата могут изменяться только две переменные $h_{\text{ш}}$ и $N = f(\alpha)$, так как величина M всегда останется постоянной. Следовательно, постоянство расхода воды по формуле 36 может получиться:

- а) или когда N и $h_{\text{ш}}$ по отдельности постоянны;
- б) или когда N и $h_{\text{ш}}$ с изменением (α) изменяются обратно пропорционально.

Полагая изменения коэффициента расхода μ_0 (при $\beta = 1$) по формуле 35, из табл. 2 нетрудно видеть, как изменяется значение N при различных углах наклона щита.

Значение $N = f(\alpha)$ при $\beta = 1$.

Таблица 2

α°	0	5	10	17	20	30	40	50	60	70	80	90
μ_0	1,00	0,958	0,920	0,872	0,853	0,796	0,749	0,710	0,677	0,649	0,628	0,611
$N = \mu_0 \sqrt{\sin \alpha}$	0,00	0,283	0,384	0,472	0,499	0,563	0,601	0,622	0,630	0,629	0,623	0,611

Из табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1. Значение N при углах наклона щита от 90° до 40° остается почти постоянным, следовательно, по условию автоматизма на этом же участке, подщитовое отверстие ($h_{\text{ш}}$) должно также оставаться постоянным. Постоянство высоты открытия щита требует, чтобы на участке $\alpha = 40-90^\circ$ дно лотка было криволинейного очертания, причем это криволинейное очертание должно быть дугой круга, очерченного радиусом нижнего плеча щита. Принимая, согласно данным табл. 2, для участка углов наклона $\alpha = 40-90^\circ$ среднее значение $N = \mu_0 \sqrt{\sin \alpha} = 0,613$, получим из формулы 36 формулу для определения расхода автомата в виде

$$Q = 0,613 b h_{\text{ш}} \sqrt{2gl_0}. \quad (36a)$$

2. Значение N на участке $\alpha = 0-40^\circ$ изменяется в пределах от 0 до 0,60; следовательно, постоянство расхода Q можно получить

только тогда, когда (при $\alpha < 40^\circ$) $h_{\text{ш}}$ будет изменяться обратно пропорционально N , что может быть осуществлено приданием порогу криволинейного очертания соответствующей формы, уже отличающейся от окружности.

Таким образом, из сказанного вытекает, что при заданных размерах щита, оси вращения и ширине выпуска для получения постоянного расхода воды в отводе, необходимо на дне лотка, на участке радиуса действия (l_n) нижнего плеча, установить порог криволинейного очертания.

Координаты такого порога согласно рис. 5 будут определяться по формулам:

$$y = Y_0 - (h_{\text{ш}} + l_n \sin \alpha) \quad (37)$$

$$x = l_n \cos \alpha \quad (38)$$

где:

$$h_{\text{ш}} = \frac{Q}{MN} = \frac{C}{N},$$

Y_0 — высота расположения оси вращения щита,

l_n — длина нижнего плеча.

Второе практическое требование, предъявляемое к автомату, это — частичное или полное регулирование расхода выпуска без нарушения его автоматизма.

В данном автомате, для выполнения этого требования, необходимо, чтобы при заданных размерах щита, ширине выпуска и профиле порога перемещение оси щита по вертикали не нарушило автоматизма прибора (сооружения). Другими словами, необходимо, чтобы при новом положении оси вращения щита расход выпуска также оставался постоянным. Для правильного решения данной задачи прежде всего нужно выяснить, как с перемещением оси щита по вертикали изменяются ординаты профиля порога и какова будет ошибка в величине расхода, если профиль порога принять неизменным, так как по условиям эксплуатации недопустимо, чтобы регулирование расхода автомата требовало изменения частей сооружения (в данном случае профиля порога).

Как указывалось выше, нами проводилось параллельное изучение двух различных видов модели автомата. Это различие заключалось в формах криволинейного очертания порога, что было вызвано различными предположениями о законе изменения величины коэффициента расхода μ . В первом предположении коэффициент расхода μ принят переменным, меняющимся по фор-

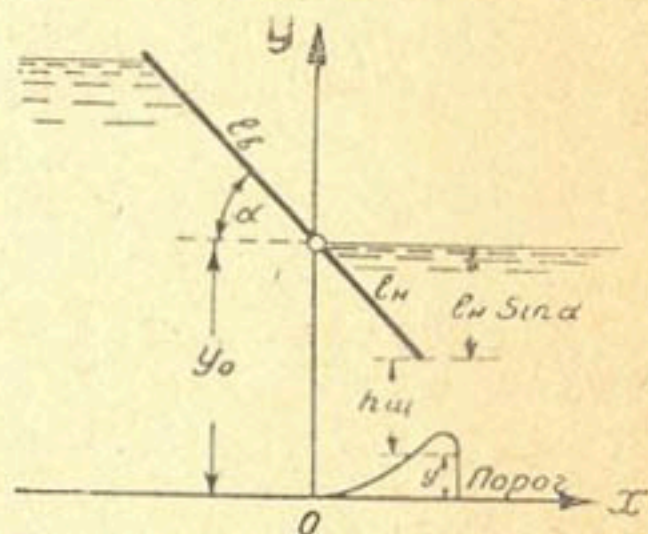


Рис. 5.

муле 35, при втором — $\mu = \text{Const} = 0,70$. Чтобы сравнить решения, получаемые в обоих указанных случаях, прежде всего рассмотрим характер изменения максимальных ординат порога автомата. Имеем:

а) порог автомата рассчитывается при коэффициенте расхода (μ_0), изменяющемся по формуле 35;

б) порог автомата рассчитывается при постоянном коэффициенте расхода.

Аналитические формулы для определения максимальной координаты порога при изменяющемся коэффициенте расхода μ_0 по формуле 35 могут быть выведены из формул 37 и 38.

Из формулы 21

$$h_{\text{ш}} = \frac{Q}{b \sqrt{2gl_{\text{в}}}} \cdot \frac{1}{\mu_0 \sqrt{\sin \alpha}} \quad (39)$$

Обозначая через

$$P = \frac{Q}{b \sqrt{2gl_{\text{в}}}} \quad (40)$$

Получим:

$$h_{\text{ш}} = \frac{P}{\mu_0 \sqrt{\sin \alpha}} \quad (41)$$

Подставляя $h_{\text{ш}}$ из формулы 41 в ф-лу 37, имеем:

$$Y = Y_0 - \left(\frac{P}{\mu_0 \sqrt{\sin \alpha}} + l_{\text{н}} \sin \alpha \right) \quad (42)$$

Для определения $Y_{\text{max}} = f(\alpha_{\text{max}})$ предварительно найдем α_{max} из условия

$$\frac{dY_{\text{max}}}{d\alpha_{\text{max}}} = 0$$

Имея в виду, что

$$\frac{dY_0}{d\alpha_{\text{max}}} = \frac{dP}{d\alpha_{\text{max}}} = \frac{dl_{\text{н}}}{d\alpha_{\text{max}}} = 0$$

получаем:

$$\frac{dY_{\text{max}}}{d\alpha_{\text{max}}} = -P \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{1}{\mu_0 \sqrt{\sin \alpha}} \right) - l_{\text{н}} \cos \alpha \quad (43)$$

Подставляя значение μ_0 из формулы 35, имеем:

$$\frac{d}{d\alpha_{\text{max}}} \left(\frac{1}{\mu_0 \sqrt{\sin \alpha}} \right) = \frac{1}{\beta} \frac{d}{d\alpha_{\text{max}}} \left(\frac{1 + \alpha - \cos \alpha}{\alpha \sqrt{\sin \alpha}} \right) =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\beta} \left[\frac{1 + \sin \alpha}{\alpha \sqrt{\sin \alpha}} + (1 + \alpha - \cos \alpha) \cdot \left(\frac{1}{-\alpha^2 \sqrt{\sin \alpha}} - \frac{\operatorname{Cotg} \alpha}{2\alpha \sqrt{\sin \alpha}} \right) \right] = \\
&= \frac{1}{\beta} \left[\frac{1 + \sin \alpha}{\alpha \sqrt{\sin \alpha}} + \frac{1 + \alpha - \cos \alpha}{\alpha \sqrt{\sin \alpha}} \left(-\frac{1}{\alpha} - \frac{\operatorname{Cotg} \alpha}{2} \right) \right] = \\
&= \frac{1}{\beta \alpha \sqrt{\sin \alpha}} \left[(1 + \sin \alpha) - (1 + \alpha - \cos \alpha) \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\operatorname{Cotg} \alpha}{2} \right) \right] \quad (44)
\end{aligned}$$

Подставляя полученное выражение ф-лы 41 в ф-лу 43, имеем:

$$\begin{aligned}
\frac{dY_{\max}}{d\alpha_{\max}} &= -\frac{P}{\beta \alpha \sqrt{\sin \alpha}} \left[(1 + \sin \alpha) - (1 + \alpha - \cos \alpha) \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\operatorname{Cotg} \alpha}{2} \right) \right] - l_n \cos \alpha = 0.
\end{aligned}$$

Откуда, решая относительно P , получим:

$$P = -\frac{\beta l_n \alpha \cos \alpha \sqrt{\sin \alpha}}{(1 + \sin \alpha) - (1 + \alpha - \cos \alpha) \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\operatorname{Cotg} \alpha}{2} \right)} \quad (45)$$

или:

$$C = \frac{Q}{\beta l_n \sqrt{2gl_n}} = -\frac{\beta \alpha \cos \alpha \sqrt{\sin \alpha}}{(1 + \sin \alpha) - (1 + \alpha - \cos \alpha) \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\operatorname{Cotg} \alpha}{2} \right)} \quad (46)$$

Из этой формулы, при заданных значениях Q ; b ; l_n ; l_n определяется $\alpha_{\max}$. В целях упрощения подсчетов дается график зависимости $\alpha_{\max} = f(c)$ при $\beta = 1,0$ (см. рис. 6).

По полученному $\alpha_{\max}$ вычисляется μ_0 по формуле 35 и затем $h_{ш}$ по формуле 39 и, наконец, $Y_{\max}$ и $X_{\max}$ по формулам 37 и 38.

Формулы для определения максимальных координат порога автомата при $\mu = \text{Const}$ могут быть получены из формулы 37, а именно:

$$Y = Y_0 - \left(\frac{P}{\mu_0 \sqrt{\sin \alpha}} + l_n \sin \alpha \right) \quad (47)$$

где

$$P = \frac{Q}{b \sqrt{2gl_n}}.$$

Приравнивая первую производную формулу 47 по (α) нулю, имеем:

$$\frac{dY_{\max}}{d\alpha_{\max}} = -\frac{P}{\mu} \frac{d}{d\alpha_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{\sin \alpha}} \right) - l_n \cos \alpha = 0 \quad (48)$$

но

$$\frac{d}{d\alpha_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{\sin \alpha}} \right) = -\frac{\cos \alpha}{2 \sin \alpha \sqrt{\sin \alpha}} \quad (49)$$

Из формул 48 и 49 имеем:

$$\frac{P}{\mu} \frac{\cos \alpha}{2 \sin \alpha \sqrt{\sin \alpha}} - l_n \cos \alpha = 0$$

или, сокращая на $\cos \alpha$, получим:

$$\frac{P}{\mu} \frac{1}{2 \sin \alpha \sqrt{\sin \alpha}} - l_n = 0$$

или

$$\frac{P}{l_n} = 2\mu \sin \alpha \sqrt{\sin \alpha} \quad (50)$$

Теперь, подставляя значение P и обозначая левую часть уравнения 50 через C , в окончательном виде имеем:

$$C = \frac{Q}{bl_n \sqrt{2gl_v}} = 2\mu \sin \alpha \sqrt{\sin \alpha} \quad (51)$$

Из формулы 51, при заданных Q ; b ; l_n ; l_v и μ , определяется $\alpha_{\max}$. По полученному $\alpha_{\max}$ вычисляется $h_{\max}$ по формуле 21 и, наконец, $Y_{\max}$ и $X_{\max}$ по формулам 37 и 38.

Для определения $\alpha_{\max}$ кривая зависимости $\alpha_{\max} = f(c)$ нанесена на график (см. рис. 6). Таким образом, на графике даны две кривые, одна — для порога автомата, рассчитанного с коэффициентом расхода по формуле 35, а вторая — для порога, рассчитанного с коэффициентом расхода $\mu = 0,70$.

Из формул 46 и 51 нетрудно видеть, что независимо от того, рассчитан ли порог автомата при переменном или постоянном коэффициенте расхода μ , координаты порога изменяются прямо пропорционально расходу выпуска. Следовательно, с изменением расхода автомата для сохранения автоматизма необходимо соответственно изменить профиль порога; в противном случае работа автомата будет нарушена.

Теперь, пользуясь вышеприведенными формулами, на конкретных примерах выясним степень изменения профиля порога и возможность практического регулирования расхода автомата при постоянном профиле порога.

4. Примеры расчета.

Примеры:

Дано: ширина выпуска $b = 1,00$ м; длина верхнего плеча $l_v = 0,50$ м; длина нижнего плеча $l_n = 0,288$ м. Горизонты воды в распределителе изменяются. Требуется рассчитать профиль порога автомата при расходах выпуска $Q = 0,100; 0,200; 0,300; 0,400; 0,500; 0,700$ и $1,000$ м³/сек.

Расчетными формулами служат 21, 37 и 38.

А. Координаты порога автомата с принятием коэффициента расхода μ по формуле 35, в зависимости от расхода выпуска и углов наклона щита к горизонту, приводятся в табл. 3. Графическое изображение профилей порога дается на рис. 7. Кривые порога помечены расходами автомата. Далее, пользуясь формулами 35, 37, 38 и 46 и графиком $\alpha_{\max} = f(c)$ (см. рис. 6), в табл. 5 даются значения максимальных координат порога и величина минимальных напоров ($z_{\min}$), которые необходимы для правильной работы автомата с постоянным расходом.

Б. Аналогично, в табл. 4 и 6 даются значения y ; x ; α и $z_{\min}$ при принятии коэффициента расхода $\mu = \text{Const} = 0,70$. Подсчеты максимальных координат $Y_{\max}$ и $X_{\max}$ произведены при помощи формулы 51 и графика $\alpha_{\max} = f(c)$ при $\mu = 0,70$ (см. рис. 6). Кривые продольных профилей порога для данного случая даются на рис. 8.

Из полученного материала (кривые порога и таблицы координат) можно сделать следующие основные выводы:

1. С изменением расхода выпуска координаты порога автомата также изменяются. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что независимо от принятого коэффициента расхода при регулировании расхода выпуска автоматизм нарушится, если соответственно не изменить профиля порога.

2. Характер изменения кривых порога различен и зависит от принятого закона изменения коэффициента расхода. Так, например:

а) при принятии μ по формуле 35 на участке $x = 20,5$ см с увеличением расхода выпуска ординаты увеличиваются, а на участке $x > 20,5$ см, наоборот, с увеличением Q выпуска — уменьшаются;

б) при $\mu = 0,70$ характер изменения постоянен и происходит оно односторонне. Так, с увеличением расхода выпуска ординаты порога на всем протяжении $x = 0,288$ м только уменьшаются.

Координаты порога автомата для случая переменного коэффициента расхода μ
по формуле 35 при $b = 1,00$, $l_B = 0,50$ м, $l_H = 0,288$ м.

Таблица 3

Высота оси вращения щита Y_0 м	Расход ав- томата Q м ³ /сек.	град α =радиан	0°	5	10	17	20	30	40	50	60	70	80	90
			0°	0,0873	0,1745	0,2967	0,3490	0,5240	0,6980	0,8730	1,0470	1,2220	1,3960	1,5710
0,340	0,100	{	— ∞	0,200	0,207	0,188	0,178	0,140	0,102	0,068	0,040	0,019	0,005	0,000
0,393	0,200		— ∞	0,137	0,176	0,173	0,166	0,135	0,101	0,069	0,042	0,020	0,006	0,000
0,445	0,300		— ∞	0,073	0,145	0,158	0,154	0,130	0,100	0,07	0,043	0,022	0,007	0,000
0,497	0,400		— ∞	0,010	0,115	0,142	0,143	0,126	0,099	0,07	0,045	0,023	0,008	0,000
0,549	0,500		— ∞	0,053	0,084	0,127	0,131	0,122	0,099	0,072	0,047	0,025	0,009	0,000
0,654	0,500		— ∞	0,179	0,022	0,096	0,107	0,113	0,097	0,074	0,050	0,028	0,011	0,000
0,811	1,000		— ∞	0,334	0,071	0,050	0,072	0,099	0,099	0,094	0,077	0,054	0,032	0,014
		x	0,288	0,287	0,284	0,275	0,271	0,249	0,221	0,185	0,144	0,098	0,050	0,000

Таблица 4

Координаты порога автомата для случая постоянного коэффициента расхода
 $\mu = 0,70$ при $b = 1,00$ м, $l_B = 0,50$ м, $l_H = 0,288$ м

Высота оси вращения щита Y_0 м	Расход ав- томата Q м ³ /сек.	град α =радиан		5	10	17	20	30	40	50	60	70	80	90
		Координаты порога в м												
		0°		0,0873	0,1745	0,2967	0,3490	0,5240	0,6980	0,8730	1,0470	1,2220	1,3960	1,5710
0,334	0,100	— ∞		0,154	0,175	0,165	0,157	0,125	0,092	0,061	0,035	0,016	0,004	0,000
0,379	0,200	— ∞		0,045	0,110	0,126	0,125	0,106	0,080	0,055	0,032	0,015	0,004	0,000
0,425	0,300	— ∞		—0,064	0,046	0,088	0,092	0,087	0,069	0,048	0,028	0,013	0,003	0,000
0,470	0,400	— ∞		—0,173	—0,017	0,049	0,060	0,068	0,058	0,042	0,025	0,012	0,003	0,000
0,517	0,500	— ∞		—0,282	—0,080	0,011	0,028	0,050	0,047	0,036	0,022	0,011	0,003	0,000
0,744	1,000	— ∞		—0,827	—0,400	—0,183	—0,134	—0,045	—0,010	0,004	0,005	0,003	0,001	0,000
		0,288		0,287	0,284	0,275	0,271	0,249	0,221	0,185	0,144	0,098	0,050	0,000

Значения максимальных координат ($X_{\max}$, $Y_{\max}$) и минимального напора z для случая переменного коэффициента расхода μ по формуле 35 при $b = 1,00$ м, $l_n = 0,50$ м и $l_n = 0,288$ м даны в табл. 5.

Таблица 5

Q м ³ /сек.	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,700	1,000
$C = \frac{Q}{bl_n \sqrt{2gl_n}}$	0,109	0,217	0,326	0,434	0,543	0,761	1,085
$\alpha_{\max}^0$	8,0	12,0	15,6	19,5	21,4	26,0	32,0
$y_{\max}$	0,207	0,179	0,157	0,143	0,131	0,117	0,107
$x_{\max}$	0,285	0,281	0,276	0,272	0,265	0,259	0,242
$z_{\min}$	0,070	0,104	0,135	0,167	0,182	0,219	0,265

Значения максимальных координат ($X_{\max}$ и $Y_{\max}$) и минимального напора $z_{\min}$ для случая постоянного коэффициента расхода $\mu = 70$ при $b = 1,00$ м, $l_n = 0,50$ м и $l_n = 0,288$ м даны в табл. 6.

Таблица 6

Q м ³ /сек.	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,700	1,000
$C = \frac{Q}{bl_n \sqrt{2gl_n}}$	0,109	0,219	0,326	0,434	0,543	0,761	1,085
$\alpha_{\max}^0$	9,5	18,0	22,5	27,5	32,0	40,0	56,0
$y_{\max}$	0,174	0,126	0,094	0,070	0,051	0,027	0,005
$x_{\max}$	0,284	0,273	0,265	0,255	0,244	0,221	0,160
$z_{\min}$	0,083	0,155	0,191	0,231	0,265	0,321	0,415

3. Выясняя величину отклонения расхода автомата при заданном профиле порога (для случая μ , изменяющегося по формуле 35), находим, что если на участке радиуса действия нижнего плеча щита от $\alpha = 90^\circ$ до $\alpha = 40^\circ$ профиль порога будет рассчитан по радиусу круга (что соответствует профилю порога при $Q = 0$), то с пропуском увеличенных расходов мы получим соответствующие ошибки. Так например, для наклона щита $\alpha = 70^\circ$, т. е. при $x = 0,098$ м, соответствующего наибольшему отклонению ординат порога от дуги окружности (см. рис. 7), при различных расчетных расходах фактические расходы автомата будут таковы:

Таблица 7

Q расч.	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,700	1,000
Q факт.	0,103	0,206	0,303	0,411	0,515	0,720	1,029
Погрешн. %	+3,0	+3,0	+3,0	+2,8	+3,0	+3,0	+2,9

Из табл. 7 видно, что расхождения составляют всего 3%, т. е. практически настолько незначительны, что ими вполне можно пренебречь. Таким образом, на участке $\alpha = 90 - 40^\circ$ профиль порога можно принять за дугу круга с радиусом $R = l_n$. В этом случае координаты порога будут определяться по формулам:

$$Y = l_n (1 - \sin \alpha) \quad (52)$$

$$X = l_n \cos \alpha \quad (53)$$

4. На участке радиуса действия щита $\alpha < 40^\circ$ изменение расхода автомата будет зависеть от принятого профиля порога. Так например, если считать, что порог на этом участке рассчитан на расход $Q = 0,500 \text{ м}^3/\text{сек.}$, то при пропуске расходов больше или меньше расчетного расхода для вертикали максимальных координат при $\alpha = 21,4^\circ$ мы будем иметь следующие отклонения (см. табл. 8).

Таблица 8

Q теор.	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,700	1,000
Q факт.	0,166	0,249	0,332	0,415	0,500	0,664	0,915
Погрешн. %	+66	+24,5	+10,7	+3,8	0	-5,1	-8,5

Из табл. 8 видно, что на участке максимальных ординат регулирование расхода автомата в сторону уменьшения на 80% может дать ошибку до +66%. Такая ошибка безусловно недопустима. При уменьшении предела регулирования до 40% погрешность в расходах значительно уменьшается и достигает кругло +11%. Регулирование расхода в сторону увеличения до 100% дает ошибку -8,5%. Эти подсчеты показывают, что регулирование расходов автомата (при постоянном расчетном профиле порога) в пределах от -40% до +100% дает в величине фактического расхода в среднем до 10% отклонения от расчетного.

5. Произведя аналогичные подсчеты для вертикали макси-

мальных координат порога, рассчитанного при $\mu = \text{Const} = 0,70$, имеем:

Таблица 9

Q теор.	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,700	1,000
Q факт.	0,206	0,280	0,352	0,425	0,500	0,642	0,861
Погрешн. %	+106	+40	+17,3	+6,3	0,00	-8,3	-13,9

Рассматривая данные табл. 9, легко видеть, что при расчете порога на расход $Q = 0,500 \text{ м}^3/\text{сек.}$ и при регулировании расхода выпуска в сторону уменьшения от расчетного до 80% отклонение в расходе автомата для угла наклона щита α может достигать более +100%, а это безусловно не может быть допущено. Уменьшая предел регулирования до 20%, снижаем величину колебания до +6,3%, т. е. до практически вполне приемлемой величины.

Регулирование расхода в сторону его увеличения на +40% дает отклонения на -8,3%, а при увеличении его на +100% — на -13,9%.

Таким образом, практически пределы регулирования расходов автомата с порогом, рассчитанным при $\mu = \text{Const} = 0,70$, значительно ниже, чем при пороге автомата, рассчитанного с переменным коэффициентом расхода μ по формуле 35.

6. Амплитуда действия автомата ограничивается пределами изменения угла наклона α от 90° (вертикальное положение щита) до α_{max} . Уменьшение угла наклона щита менее $\alpha = \alpha_{\text{max}}$ уже приводит к уменьшению расхода выпуска по сравнению с расчетным, вследствие того, что с уменьшением угла α менее $\alpha = \alpha_{\text{max}}$ теоретически величина открытия $h_{\text{ш}}$ должна быстро возрастать (см. рис. 7 и 8). Между тем, при таком быстром возрастании влияние вершины порога безусловно будет иметь решающее значение (в смысле уменьшения фактического открытия щита по сравнению с необходимым). Из табл. 3—6 видно, что с увеличением расхода автомата амплитуда действия уменьшается. Это уменьшение особенно заметно для автомата с порогом, рассчитанным при $\mu = 0,70$.

Так например, при пропуске $Q = 0,100 \text{ м}^3/\text{сек.}$, $\alpha = 9,5^\circ$, $z_{\text{min}} = 8,3 \text{ см.}$, а при пропуске $Q = 1,00 \text{ м}^3/\text{сек.}$, $\alpha = 56^\circ$, $z_{\text{min}} = 41,5 \text{ см.}$

Для тех же расходов при пороге автомата, рассчитанного по формуле 35, будем иметь:

$$Q = 0,100 \text{ м}^3/\text{сек.} \quad \alpha_{\text{max}} = 8^\circ \quad z_{\text{min}} = 8 \text{ см.}$$

$$Q = 1,000 \text{ м}^3/\text{сек.} \quad \alpha_{\text{max}} = 38^\circ \quad z_{\text{min}} = 26,5 \text{ см.}$$

Эти подсчеты показывают, что для правильной работы автомата требуются значительные потери напора. Однако, вследствие закругленности оголовка порога и незначительности изменения

ординат порога на участке $Y_{\max}$ и $X_{\max}$ надо полагать, что практически с небольшой погрешностью в расходе (т. е. нарушением постоянства расхода) величина $z_{\min}$ будет значительно ниже, чем это требуется по расчету. Уменьшение величины $z_{\min}$ необходимо для более широкого применения данного автомата на системе, где получить большие перепады невозможно.

5. Выводы.

1. Для получения постоянного расхода в выпуске при изменяющихся горизонтах (напорах) воды в распределителе необходимо:

а) в прямоугольном отверстии выпуска на горизонтальной оси установить свободно вращающийся плоский щит с неравными плечами,

б) на дне выпуска на участке радиуса действия нижнего плеча щита установить порог.

2. Размеры плеч щита, в зависимости от заданных горизонтов воды в нижнем бьефе, будут определяться по формулам 6 и 18:

$$l_v = \sqrt{\frac{3}{1 + \eta + \eta^2}} l_n \quad (6)$$

$$l_v = 2l_n \quad (18)$$

Формула 6 дается для случая затопленного отверстия, когда горизонты воды в нижнем бьефе находятся на уровне оси или выше ее, а формула 18 — для случая свободного истечения, т. е. когда отверстие автомата не затоплено. Практически автомат будет лучше всего работать при постоянном положении горизонтов воды нижнего бьефа на уровне оси вращения щита. В этом случае $\eta = 0$, и тогда из формулы 6 имеем:

$$l_v = 1,735 l_n \quad (6a)$$

3. Независимо от принятого коэффициента расхода (переменный или постоянный) регулировка автомата путем перемещения оси щита вверх или вниз при постоянном профиле порога нарушает постоянство расхода выпуска. Погрешность в расходах при регулировке автомата с порогом, рассчитанным по формуле 35, меньше, чем с порогом при $\mu = \text{Const} = 0,70$.

4. Если допустить погрешность в расходах автомата до 10% при работе его с наклонами щита, близкими к $\alpha_{\max}$ (участок максимальных ошибок), то предел регулирования расхода в зависимости от принятого коэффициента расхода будет:

а) при μ переменном по формуле 35 — 40% и +100%,

б) при $\mu = \text{Const} = 0,70$ — 30% и +60%.

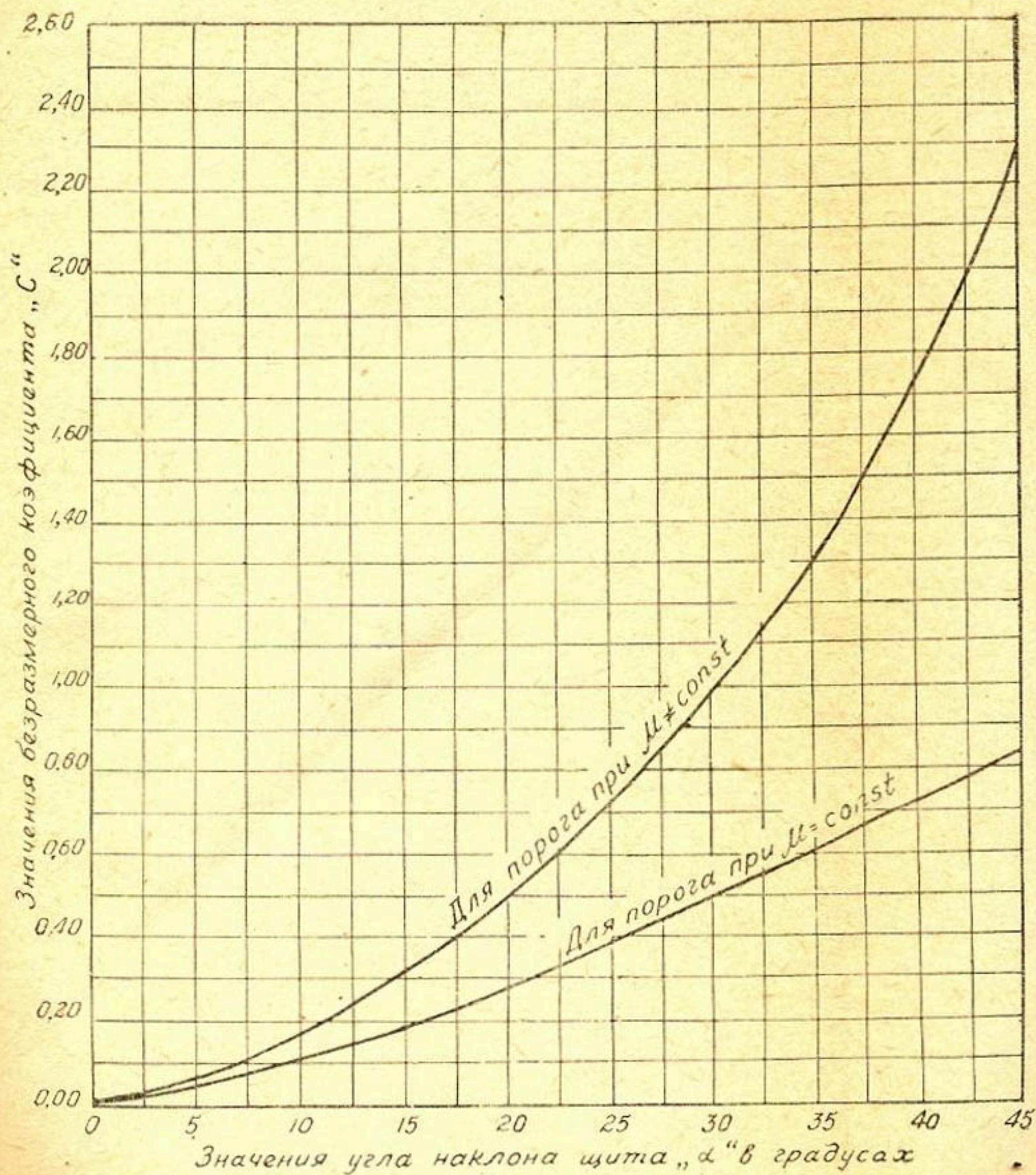


Рис. 6.

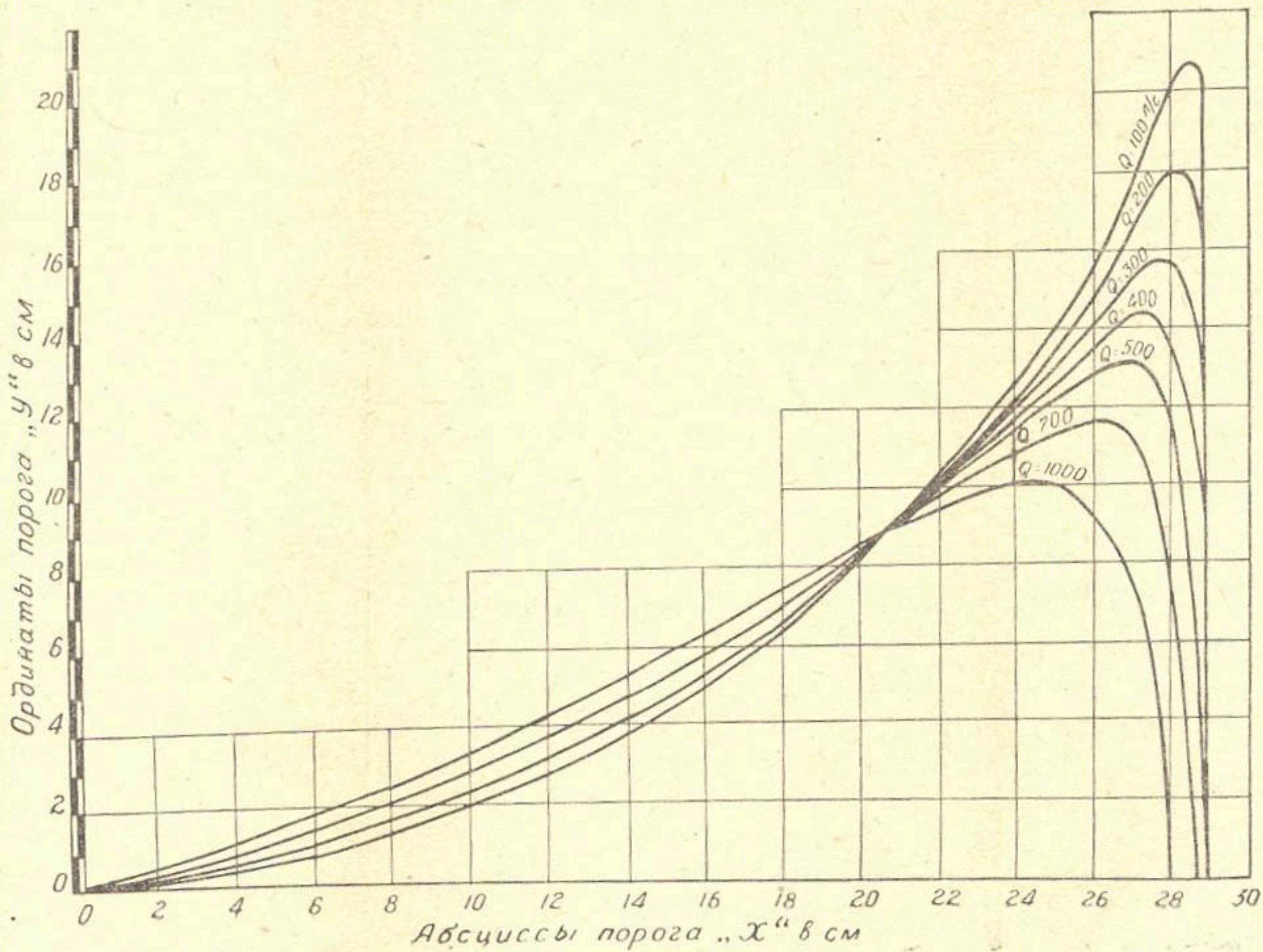


Рис. 7.

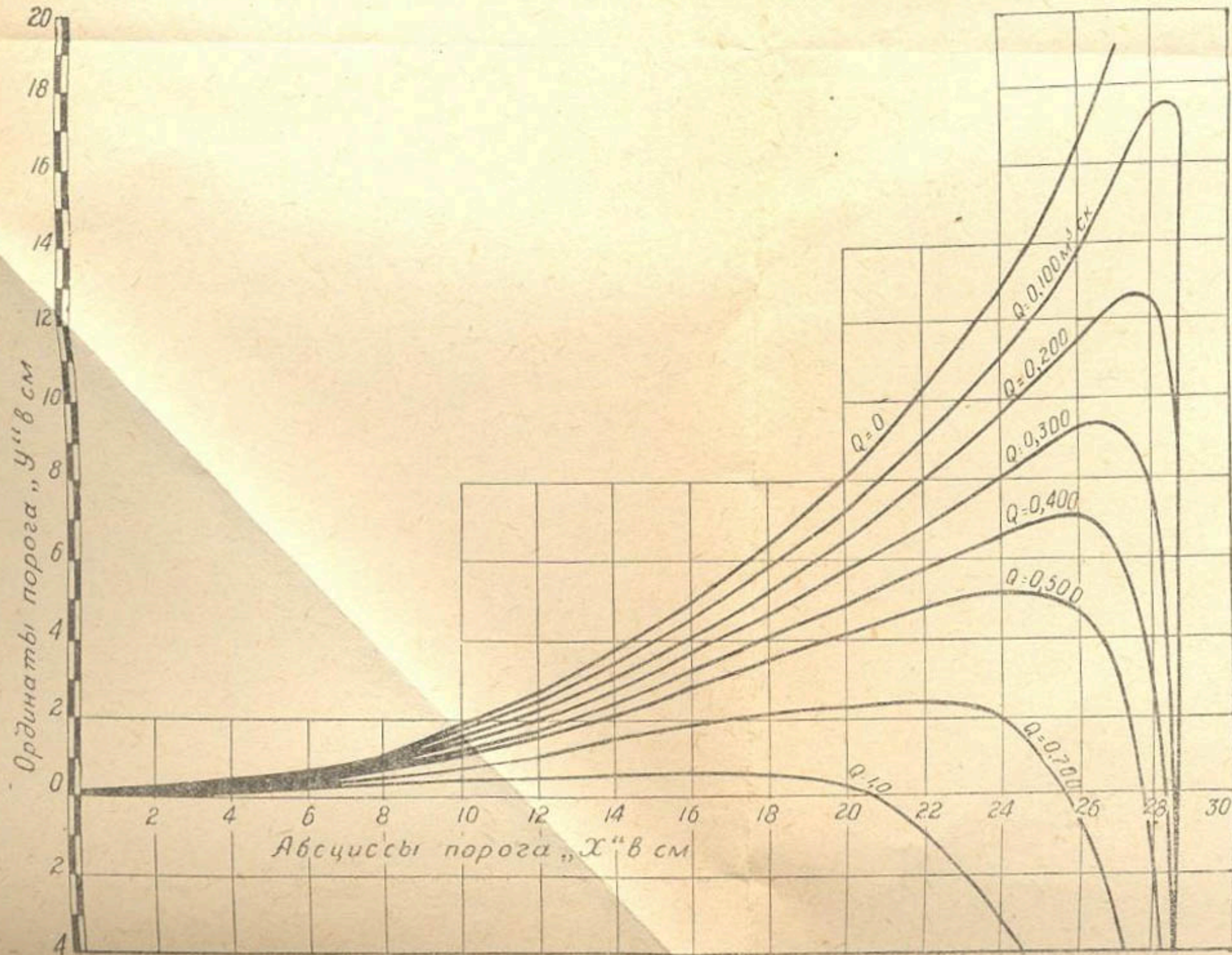


Рис. 8.

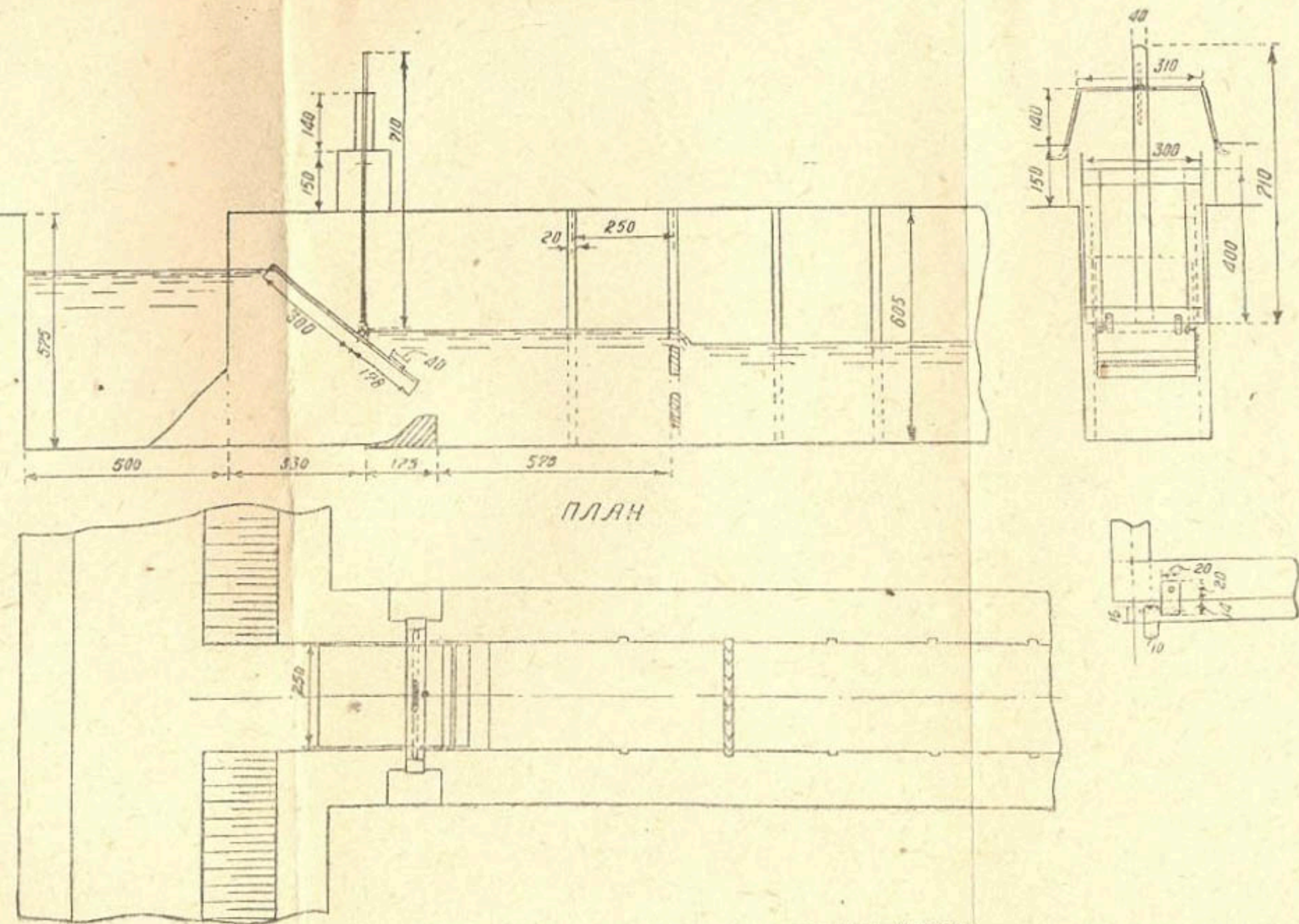


Рис. 9. Модель водомера с вращающимся щитом.

5. На участке $x = l_n \cos \alpha$, $\alpha = (40-90^\circ)$, при принятии профиля порога за дугу круга с радиусом $R = l_n$ наибольшая погрешность в расходах по сравнению с профилями порога, рассчитанного по формуле 35, составляет всего около 3% (см. табл. 7). Пренебрегая этой погрешностью на участке $x = l_n \cos (40-90)$, практически кривую порога можно принять за дугу круга и расчет координат производить по формулам 52 и 53.

6. Теоретический предел действия автомата или, что то же, величина минимальных напоров определяется из формулы 49 при переменном μ и из формулы 50 при постоянном μ . При $l_n = 0,50$ м, согласно приведенным выше подсчетам, величина z_{min} будет:

Таблица 10

Q л/сек.	z_{min} в см	
	μ по ф-ле 35	$\mu = \text{Const} = 0,70$
100	8,0	8,5
200	10,4	15,5
300	13,5	19,1
400	16,7	23,1
500	18,2	26,5
700	21,9	32,1
1000	26,5	41,5

Из табл. 10 видно, что при профилях порога, рассчитанного с переменным коэффициентом расхода, предел применимости автомата значительно шире, чем при $\mu = \text{Const} = 0,70$.

Если допустить погрешность в расходе автомата на 2—3% при углах $\alpha < \alpha_{max}$, то значение z_{min} может быть уменьшено на 20—30%. Подобное снижение величины необходимого напора еще больше расширяет возможность применения автомата на таких системах, где получение больших напоров не всегда возможно.

III. Испытание водомера-автомата с вращающимся щитом в лабораторных условиях.

1. Задачи лабораторных исследований.

В задачу лабораторных исследований входило следующее:

1. Проверка работы водомера-автомата с точки зрения пода-

чи постоянного расхода воды из распределителя в выпуск при изменяющихся горизонтах воды в распределителе.

2. Проверка и уточнение формул по расчету размеров щита и порога автомата.

3. Установление возможности регулирования расходов автомата, при заданных размерах щита и порога, путем перемещения оси щита по вертикали.

4. Изучение характера режима потока в нижнем бьефе выпуска при различных формах порога и различных величинах напора.

2. Описание модели и методика производства опытов.

Как указано выше, в лаборатории были построены две модели автомата.

Размеры первой модели следующие:

1. Ширина щитового отверстия $b = 0,16$ м;

2. Размеры плеч определялись по формуле 6, т. е. при $\eta = 0$ и $z = l_n = 0,18$ м. Нижнее плечо получается равным $l_n = 0,104$ м.

Стенки лотков выпуска и распределителя были из бетона, а порог — деревянный. При расчете порога по формулам 21, 37 и 38 коэффициент расхода μ_0 принимался постоянным и равным $\mu = 0,70$.

Вторая модель была выполнена в масштабе 1,56 по отношению к первой модели.

Эта модель (№ 2) состояла из следующих частей (см. рис. 9):

1) прямоугольного распределительного канала с выпуском, расположенным под прямым углом к оси распределителя;

2) свободно вращающегося плоского металлического щита, шарнирно прикрепленного к нижней кромке металлической рамы.

Для свободного перемещения оси щита по вертикали при изменении величины забираемого выпуском постоянного расхода, в боковых устоях лотка выпуска были сделаны вертикальные пазы.

Для обеспечения свободного вращения щита вокруг горизонтальной оси, щит был сделан на 3 мм уже ширины лотка выпуска.

Принимая горизонты воды в выпуске на уровне оси вращения щита и максимальное колебание горизонтов в верхнем бьефе (т. е. в распределителе) в пределах до 0,30 м, по формуле 6 при $\eta = 0$, имеем:

$$l_v = 1,735 l_n, \text{ откуда } l_n = \frac{0,30}{1,735} = 0,173 \text{ м.}$$

Таким образом, длина верхнего плеча $l_v = 0,30$ м и нижнего $l_n = 0,173$ м;

3) деревянного криволинейного порога с различными координатами, а именно: первый порог был рассчитан при $\mu = 0,70$ и второй порог — с переменным коэффициентом расхода;

4) отводящего прямоугольного лотка выпуска постоянного сечения шириной 0,25 м и длиной более 3,00 м. Для регулирования горизонтов воды в выпуске, т. е. для зарядки водомера-автомата (установления горизонтов воды в нижнем бьефе на заданной высоте), в устоях прямоугольного лотка для укладки шандор были сделаны вертикальные пазы. При испытании первого порога на расстояние 0,80 м ниже порога в лотке был сделан колодец глубиной 0,05 м;

5) двух водосливов Чиполетти для изменения расходов воды, установленных в начале распределителя и в конце выпуска.

Во время опытов производились замеры и наблюдения:

- а) расхода воды по распределителю и выпуску,
- б) горизонта воды по оси распределителя и выпуска,
- в) положения щита,
- г) положения и месторасположения шандор,
- д) наблюдения за характером движения воды в нижнем бьефе автомата при различных профилях порога и разности напоров (z).

Создание различных напоров в верхнем бьефе автомата (т. е. в распределителе) производилось как путем пропуска по распределителю расходов на 20—50% более расхода выпуска, так и изменением скоростей подхода путем создания подпора.

3. Краткое описание опытов и их результаты.

А. Опыты на модели № 1.

На модели № 1 были проведены две серии опытов: первая — а (7 опытов) при расходе $Q_{\text{ср}} = 9$ л/сек. и вторая — в (3 опыта) — при расходе $Q_{\text{ср}} = 13,35$ л/сек.

Разность горизонтов z или, что то же, колебание горизонтов в верхнем бьефе изменялось в пределах от 4 до 17 см.

Основные данные, характеризующие опыты на модели № 1, приведены в табл. 11, а продольные профили горизонтов воды, замеренные по оси выпуска, — на рис. 10.

Б. Опыты на модели № 2.

Работа автомата на модели № 2 изучалась при установке трех различных видов порога.

Первые два вида порога рассчитывались на пропуск 30 л/сек. при постоянном коэффициенте расхода $\mu = 0,70$.

Третий порог также рассчитывался на пропуск $Q = 30$ л/сек. при переменном коэффициенте расхода μ_0 по формуле 35.

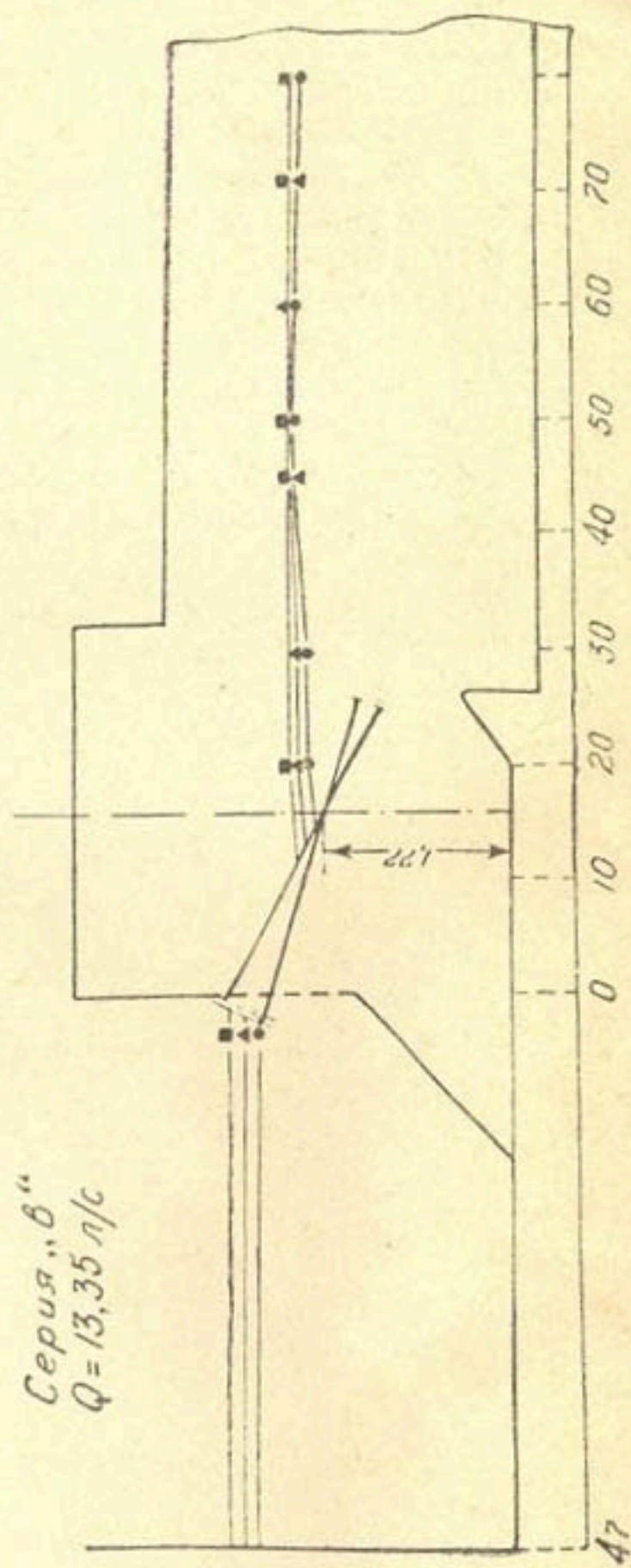
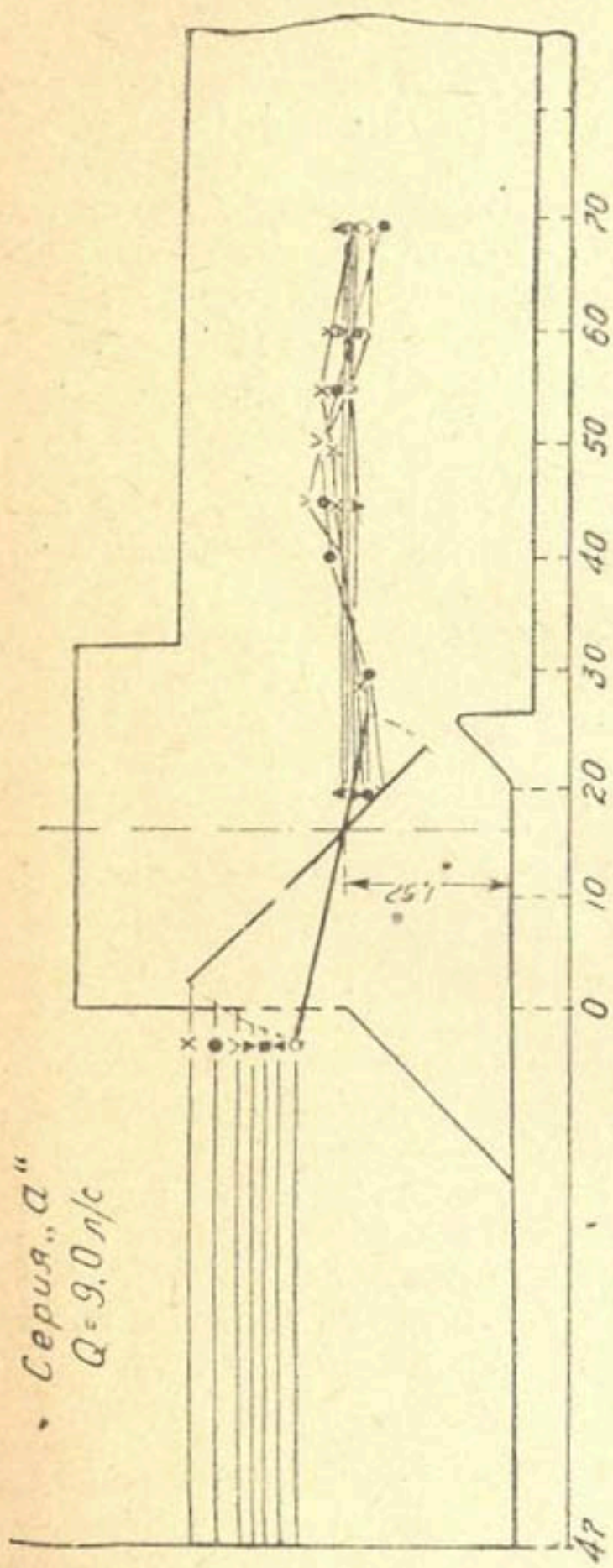


Рис. 10. Горизонты воды в опытах на модели № 1.

Таблица 11

Основные данные опытов на модели водомера-автомата № 1.

№ серии	№ опы- та	Высота оси вращения щита в см	$h_{ш}$ при $\alpha = 90^\circ$ в см	Расход автомата Q в л/сек.	Разность напоров z в см
а	1	15,2	4,8	9,0	4,00
	2	15,2	4,8	9,0	5,70
	3	15,2	4,8	9,0	7,12
	4	15,2	4,8	9,0	8,80
	5	15,2	4,8	9,0	10,45
	6	15,2	4,8	9,0	13,00
	7	15,2	4,8	9,0	16,6
		$Y_0 = 15,2$	$h_{ш} = 4,8$	$Q_{ср} = 9,0$ л/сек. $q = 0,0562$ м³/сек.	4,0—16,6
в	1	17,7	7,30	13,30	3,7
	2	17,7	7,30	13,40	4,0
	3	17,7	7,30	13,45	6,0
		$Y_0 = 17,7$	$h_{ш} = 7,30$	$Q_{ср} = 13,35$ л/сек. $q = 0,0835$ м³/сек.	3,7—6

а) Опыты при порогах № 1 и № 2.

Согласно фактическим замерам, пороги № 1 и № 2 имели следующие координаты:

Таблица 12

№ по- рога	№ сер. опытов	$X_{см}$	6,2	9,0	10,4	12,0	13,0	14,0	14,8	15,4	16,0	16,4	16,8	17,4	18,0
1	I, II, III	$Y_{см}$	0,6	1,0	1,6	2,6	3,4	4,5	5,2	5,6	5,9	6,0	5,5	0,0	0,0
2	с IV по VIII	$Y_{см}$	0,6	1,0	1,6	2,6	3,4	4,5	5,3	5,8	5,6	6,8	6,9	7,1	0,0

Из табл. 12 видно, что ординаты порога № 2 на участке оси $x = 14—17,4$ см были несколько выше, чем у порога № 1. Наибольшая разность отметок между максимальными ординатами порогов № 1 и № 2 составляет 1,1 см (см. рис. 11).

Координаты порога № 2 почти полностью совпадают с расчетными координатами порога при $\mu = 0,70$. Несовпадение координат порога № 1 с расчетными произошло из-за недостаточной тщательности постройки порога № 1.

Согласно формуле (51)

$$\frac{Q}{l_{нб} \sqrt{2gl_{в}}} = 2\mu \sin \alpha \sqrt{\sin \alpha}$$

при $Q = 30$ л/сек.; $\mu = 0,70$; $l_{н} = 0,174$; $l_{в} = 0,30$ м и $b = 0,25$ м;
 $\alpha = 20^\circ$.

Из этого расчета следует, что пределом действия автомата при наличии такого расчетного порога является угол наклона щита от 90° до 20° .

Согласно теории, при углах наклона щита $\alpha_{\max} = 20^\circ$ расход автомата должен быть меньше расчетного.

При установке порога № 1 проведены 3 серии опытов, а при установке порога № 2 — 5 серий. Всего проведено 36 опытов.

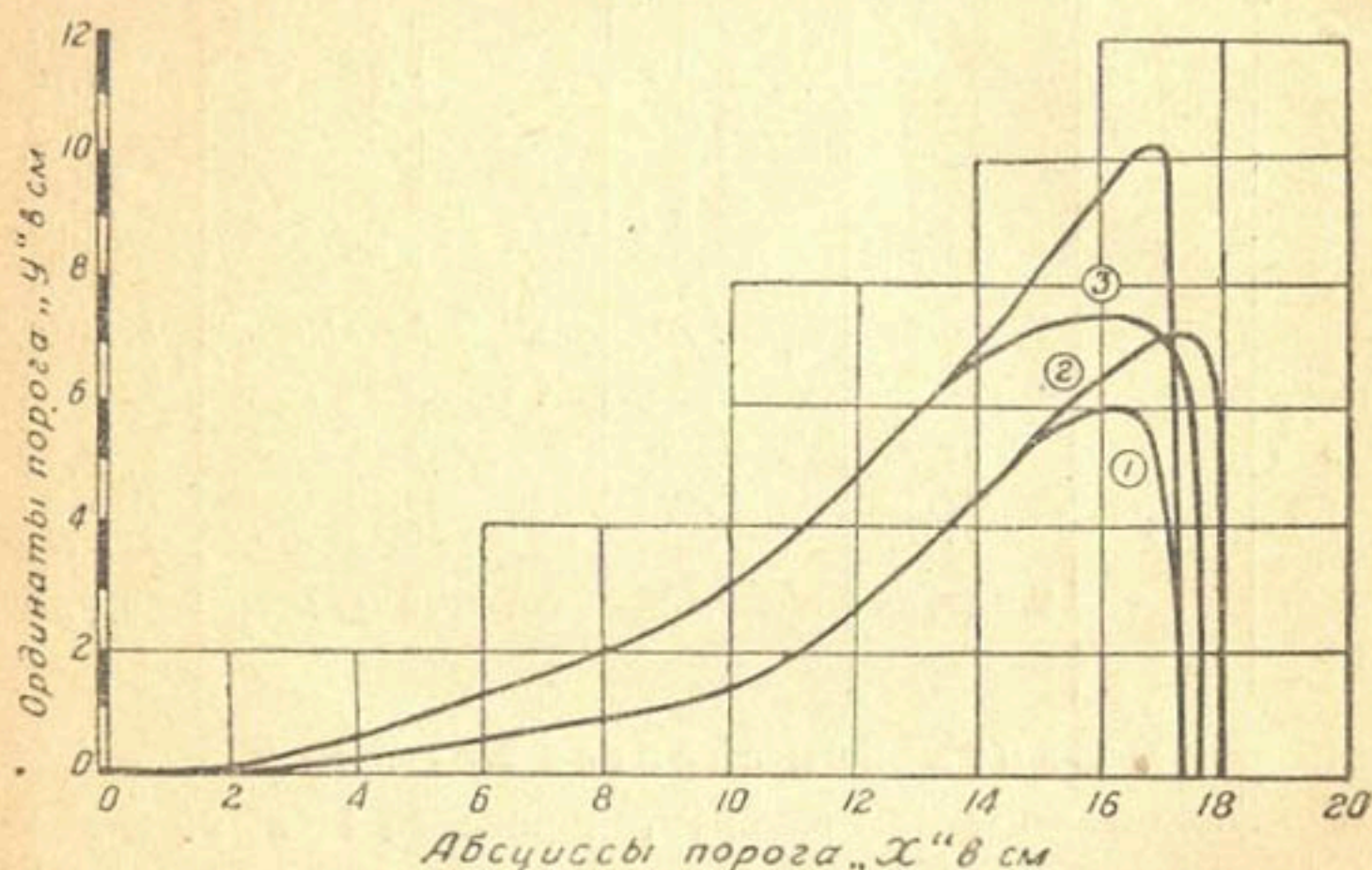


Рис. 11.

При производстве опытов для предохранения автомата от попадания мусора, перед входом в выпуск была установлена решетка.

Краткая характеристика опытов.

Серия первая. Проведено 5 опытов. Средний расход автомата $Q_{\text{ср}} = 31$ л/сек. При разных положениях щита отдельные замеры расхода показали отклонение от среднего расхода на 4—5%. Разность напоров (z) в опытах колебалась в пределах от 3,3 см до 24,5 см. Наклон щита при этом изменялся от 7° до 55° . Для лучшей работы нижнего бьефа автомата и поддержания горизонтов на уровне оси вращения щита, на расстоянии 115 см от оси щита были установлены шандоры в виде забральной стенки. Пропуск воды производился из-под шандор. Для создания более равномерного режима потока воды в нижнем бьефе автомата, уменьшения пульсации расхода воды автомата при больших напорах z и ликвидации образования поверхностного прыжка за порогом, при производстве опытов на модели были установлены два расщепителя с координатами 1) $x = 25$ см; $y = 15$ см и 2) $x = 43$ см, $y = 26$ см. Ширина первого расщепителя равна 1,5 см,

а второго — 3,3 см. Максимальные колебания горизонтов в верхнем бьефе автомата составляли 0,2 см, а в нижнем бьефе — около 0,7 см.

Серия вторая. Проведено 4 опыта при среднем расходе в 31,25 л/сек. Отклонение расходов отдельных опытов от среднего расхода составляло от -8% до $+5,6\%$. Разность напоров (z) изменялась от 3,7 до 19,7 см. Наклон щита при этом изменялся от 21° до 45° . Шандоры были установлены на расстоянии $l_{ш} = 200$ м от дна на высоте 18,2 см. Пропуск воды в ороситель производился и из-под шандор и через шандоры. На модели был установлен только один расщепитель шириною в 1,5 см с координатами $x = 27$ см и $y = 20$ см.

Серия третья. Проведено 4 опыта при среднем расходе автомата $Q_{ср} = 32,25$ л/сек. Отклонения от среднего расхода в опытах были от $+4$ до $-4,5\%$. Напор изменялся от 3 до 20 см, а наклон щита — от 17° до 45° . Шандоры были установлены на расстоянии 300 см от щита и на высоте 15 см от дна выпуска. Пропуск воды производился из-под шандор. На модели были установлены два расщепителя с координатами 1) $x = 25$ см, $y = 15$ см и 2) $x = 42$ см, $y = 25$ см. Ширина первого расщепителя равна 1,5 см, а второго — 2,5 см. Максимальное колебание горизонтов воды в верхнем бьефе составляло 0,3, в нижнем — около 0,7 см.

Серия четвертая. Проведено 4 опыта при среднем расходе автомата $Q_{ср} = 21,08$ л/сек. Отклонение расходов от среднего при разных опытах составляло от -5 до $+3\%$. Разность напоров z изменялась от 3,9 до 23,3 см, а наклон щита — от 19° до 42° . Шандоры были установлены на расстоянии 100 см от щита и на высоте 10 см от дна лотка. Пропуск воды в ороситель производился из-под шандор. Дополнительные гасители (ресщепители) в нижнем бьефе не устанавливались. Максимальное колебание горизонтов в верхнем бьефе составляло около 0,3, а в нижнем — около 0,7 см.

Серия пятая. Проведено 4 опыта при среднем расходе автомата $Q_{ср} = 21,84$ л/сек.; отклонения расходов от среднего в разных опытах составляли от 3,8 до 0,8%. Разность напоров z изменялась в пределах от 4,5 до 19,9 см. Шандоры были установлены на расстоянии 100 см от щита на высоте 10 см от дна лотка. Пропуск воды производился из-под шандор. Колебания горизонтов воды в верхнем бьефе составляли 0,4, а в нижнем — 0,6 см.

Серия шестая. Проведено 4 опыта при среднем расходе автомата $Q_{ср} = 28,62$ л/сек. Отклонения от среднего расхода в разных опытах достигали от -3 до $+5\%$. Разность напоров: от 4,6 до 18,75 см. Наклон щита колебался от 23° до 50° . Шандоры были установлены на расстоянии 50 см от щита, на высоте 12,7 см от дна лотка. Пропуск воды производился из-под шандор. Колебания горизонтов в верхнем бьефе составляли 0,4, а в нижнем — около 0,7 см.

Таблица 13

Основные данные опытов на модели водомера-автомата № 2 при установке порогов № 1 и № 2

№ серии	№ опы-та	Высота осн щита h_0 в см	$h_{ш}$ при $\alpha = 90^\circ$ в см	Расход автомата Q л/сек.	Разность z в см	Угол наклона щита α°	Место установки щита в см	Количество расщеплений	Примечание
I	1	25,7	8,4	30,50	3,3	17	115	1	Истечение из-под щита-дор
	2			32,25	7,2	25,5			
	3			22,25	13,5	36			
	4			30,50	20,6	50			
	5			29,50	24,5	55			
				$Q_{ср} = 31,0$ л/сек. $q = 0,124$ м³/сек.					
II	6	25,9	8,6	28,65	3,7	22	200	1	Перелив через щита-доры
	7			31,00	7,7	28			
	8			33,0	11,8	34			
	9			32,25	19,7	45			
					$Q_{ср} = 31,25$ л/сек. $q = 0,125$ м³/сек.				
III	10	25,9	8,6	30,75	3,0	16	200	2	Истечение из-под щита-дор
	11			32,75	7,6	26			
	12			33,50	13,8	36			
	13			32,00	20,1	45			
					$Q_{ср} = 32,25$ л/сек. $q = 0,129$ м³/сек.				
IV	14	22,9	5,6	20,0	3,9	19	100	нет	Истечение из-под щита-дор
	15			21,0	8,1	26			
	16			21,5	16,6	37			
	17			21,6	22,2	43			
					$Q_{ср} = 21,03$ л/сек. $q = 0,084$ м³/сек.				

№ серии	№ опыта	Высота оси шита V_0 в см	h_m при $\alpha = 90^\circ$ в см	Расход автомата Q л/сек.	Разность напоров z в см	V_0 накл. на шита α°	Место уста- новки шан- дор 1 м в см	Количество расщепле- ний	Примечание
V	18	22,9	5,6	21,0	4,6	16	100	нет	Истечение из-под шан- дор
	19			21,87					
	20			22,00					
	21			22,50					
	$Q_{\text{ср}} = 21,84 \text{ л/сек.}$ $q = 0,0875 \text{ м}^3/\text{сек.}$								
VI	22	25,9	8,6	28,50	4,60	23	50	нет	Истечение из-под шан- дор
	23			29,5					
	24			29,25					
	25			27,25					
	$Q_{\text{ср}} = 28,62 \text{ л/сек.}$ $q = 0,114 \text{ м}^3/\text{сек.}$								
VII	26	25,1	7,8	28,30	3,8	15	100	1	Истечение из-под шан- дор
	27			30,00					
	28			29,25					
	29			29,17					
	30			28,50					
	31			26,50					
	$Q_{\text{ср}} = 29,04 \text{ л/сек.}$ $q = 0,118 \text{ м}^3/\text{сек.}$								
VIII	32	28,65	11,3	35,18	4,4	19	200	нет	Истечение из-под шан- дор
	33			36,25					
	34			36,62					
	35			38,05					
	36			38,87					
	$Q_{\text{ср}} = 37,0 \text{ л/сек.}$ $q = 0,148 \text{ м}^3/\text{сек.}$								

Серия седьмая. Проведено 6 опытов при $Q_{\text{ср}} = 29,04$ л/сек. Отклонения $Q_{\text{ср}}$ в разных опытах составляли от $-2,5$ до $+2,3\%$. Разность напоров изменялась от 3,7 до 26 см, а наклон щита — от 15 до 60° . Шандоры были установлены на расстоянии 100 см от щита и на высоте 12,2 см от дна. Пропуск воды производился из-под шандор.

На модели был установлен один расщепитель шириною 3,0 см с координатами $x = 30$ см, $y = 22$ см. Колебания горизонта в верхнем бьефе составляли 0,4, а в нижнем — 0,3 см.

Серия восьмая. Проведено 5 опытов при $Q_{\text{ср}} = 37$ л/сек. Отклонения от среднего расхода автомата составляли от 4 до $+6,2\%$. Разность напоров изменялась от 4,4 до 25,7 см, наклон щита — от $\alpha = 19$ до 51° . Шандоры были установлены на расстоянии 200 см от щита и на высоте 14,7 см от дна. Пропуск воды в ороситель производился путем истечения из-под шандор. Колебания горизонта в верхнем бьефе составляли 0,5, а в нижнем — 0,9 см.

Необходимо отметить, что определение углов наклона производилось, из-за отсутствия точных приборов, неточно, а потому эти данные могут служить лишь иллюстрацией наших опытов (табл. 13).

Опыты на модели производились при расходах распределителя $Q = 40-45$ л/сек.

Основные данные опытов модели № 2 с порогами № 1 и № 2 приводятся в табл. 13.

На рис. 12 для некоторых серий опытов приводятся продольные профили горизонтов воды по распределителю и выпуску.

Из сопоставления опытных материалов модели № 1 и № 2 с порогами, рассчитанными с постоянным коэффициентом расхода, можно сделать следующие основные выводы:

1. При заданном расчетном положении оси вращения щита для всех положений щита расход выпуска (автомата) в среднем остается постоянным. При изменениях положения оси щита (эти изменения в опытах колебались в пределах от 22,9 см до 28,65) наблюдалось некоторое непостоянство расхода автомата с колебаниями его величины до $\pm 5\%$.

2. При углах наклона $\alpha < \alpha_{\text{max}} = 20^\circ$ расход автомата уменьшается (см. таблицу 13), что вполне согласуется с выводами существующей теории.

3. При регулировании расхода автомата путем перемещения оси щита вверх и вниз линейный закон $q = \alpha h_{\text{щ}}$ несколько нарушается. Так например, если для пропуса расхода автомата больше расчетного перенести ось щита на требуемую отметку, не изменяя при этом профиля порога, то фактический расход будет меньше расчетного при данной отметке оси щита. Это обстоятельство наглядно подтверждается данными опытов серии 8, где вместо $Q_{\text{расчетн.}} = 42$ л/сек. имеется расход выпуска $Q_{\text{фактич.}} = 37$ л/сек., что дает погрешность в определении величины расхода, равную $\sim 12\%$.

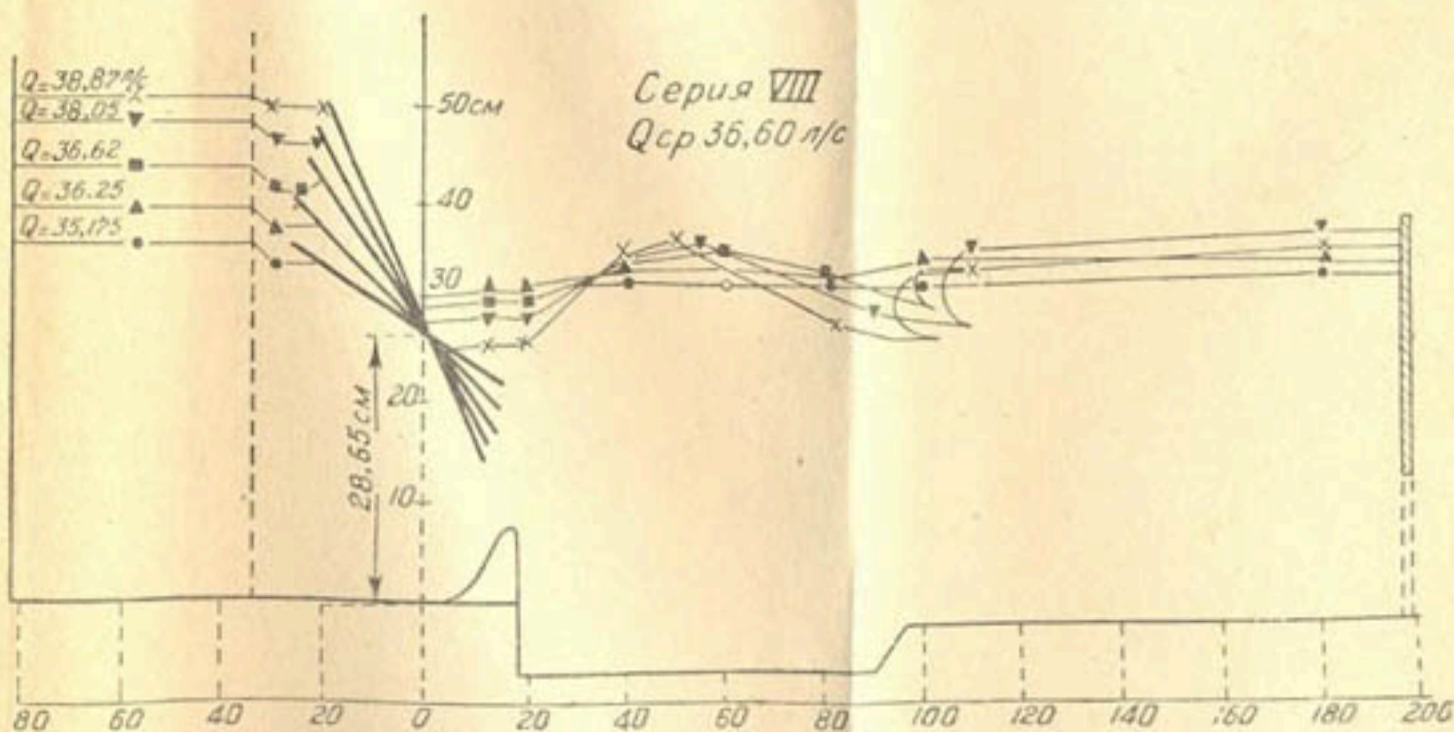
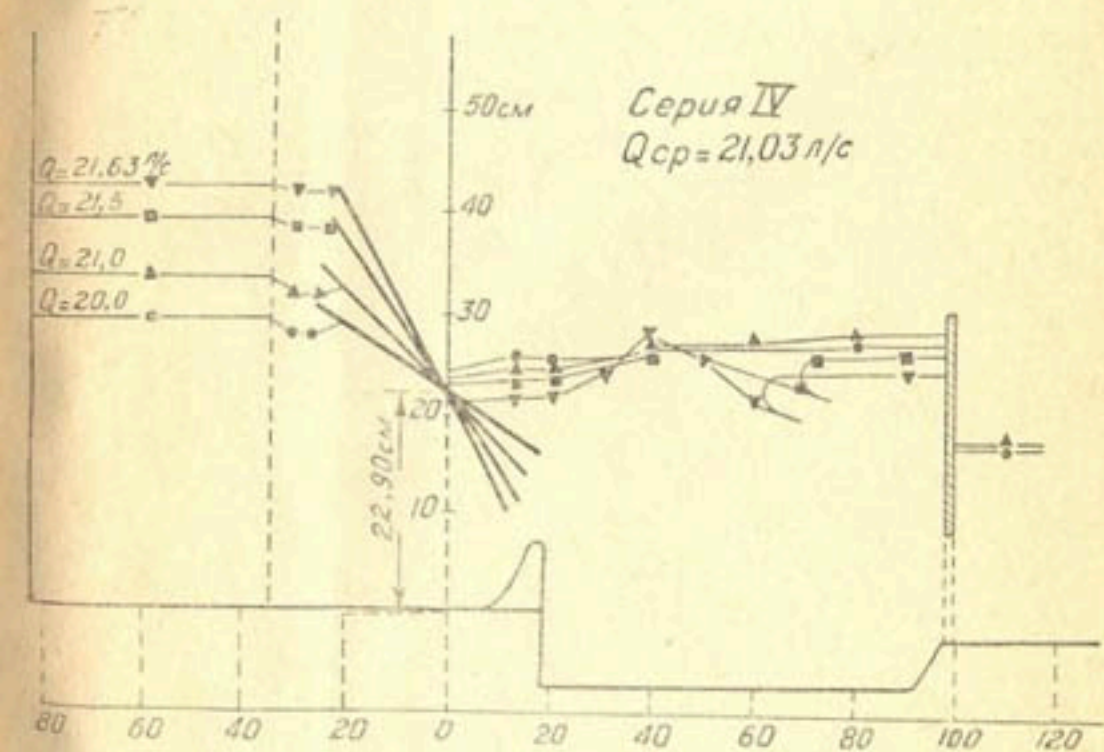
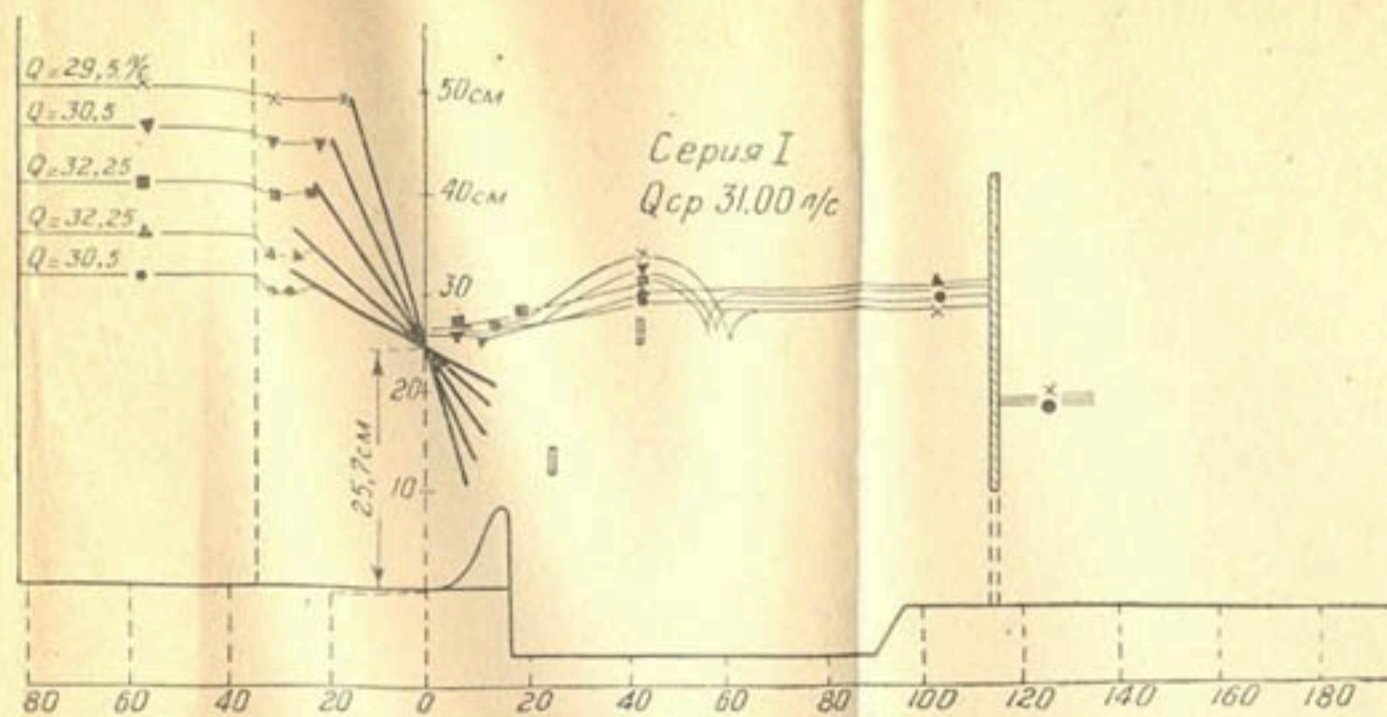
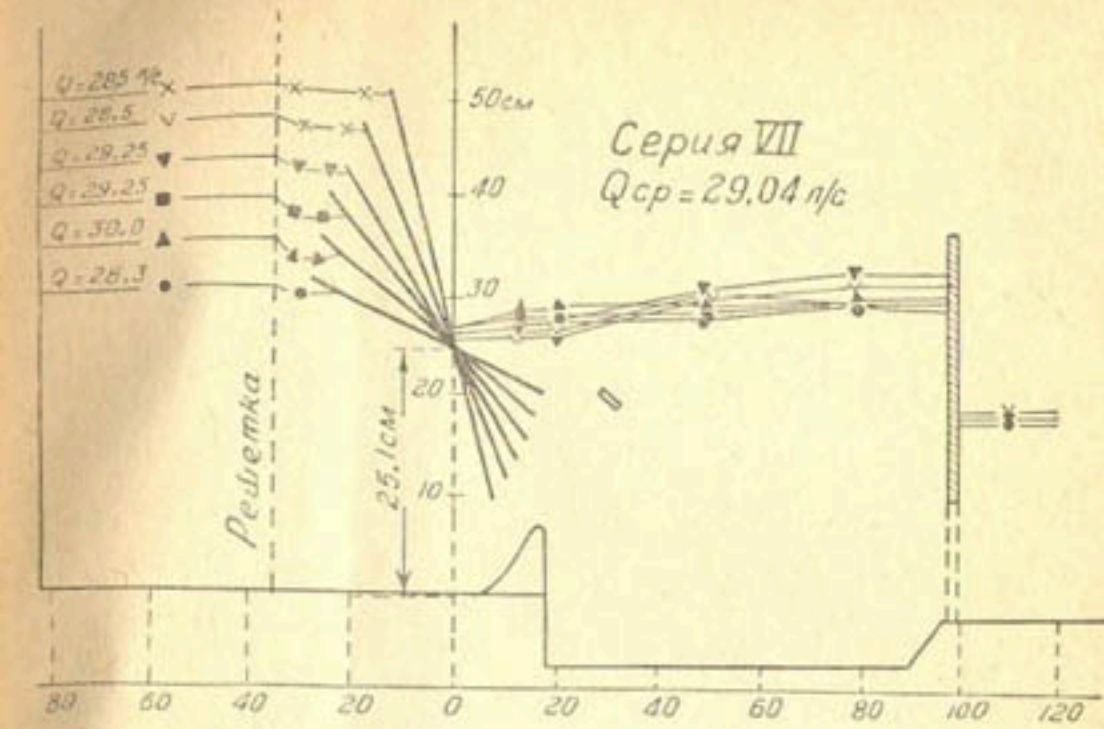


Рис. 12. Продольные профили горизонтов воды по распределителю и выпуску. Опыты на модели № 2.

Таким образом, возможность регулирования расхода автомата при наличии порога, рассчитанного с постоянным коэффициентом расхода, весьма ограничена.

4. Расчет размеров плеч по формуле 6 полностью подтверждается данными опытов.

5. Опыты как на первой, так и на второй модели, показывают, что при больших напорах ($\alpha > 40-50^\circ$), в силу больших скоростей в сжатом сечении, струя скользит по плавной кривой поверхности порога, по инерции взлетает вверх, уменьшает скорость на гребне и затем, частично разбиваясь на капли, падает в нижний бьеф. Наибольшие скорости при этом сосредоточены в верхних слоях потока, ближе к его поверхности. Бугор-волна находится примерно на расстоянии $(1,6-1,7) z_{\max}$ от оси щита. Наибольшая высота „шапки“ (бугра-волны) составляет около $(0,25-0,30) z_{\max}$. Под основной струей поверхностного потока за порогом образуется большой валец с обратными течениями. Ввиду неустойчивости режима потока в нижнем бьефе и наблюдающейся вибрации щита, расход автомата колеблется в значительных пределах (1—1,5 л/сек.).

6. Для создания более равномерного режима в нижнем бьефе автомата и уменьшения скорости, приходится ставить дополнительные гасители (расщепители), что несколько усложняет конструкцию автомата.

7. Для установки и поддержания горизонтов воды в нижнем бьефе на требуемом уровне, необходимо закладывать шандоры. Наилучшим местом установки шандор является $l_{\text{ш}} = 3l_{\text{в}} = 3z_{\text{min}}$. Установка шандор на более близком расстоянии (как в опытах серии 6) уменьшает пропускную способность автомата и вызывает значительную пульсацию вследствие удара струи о плоскость шандор. Пропуск воды в ороситель лучше всего производить из-под шандор и через шандоры.

8. Устройство колодца в нижнем бьефе автомата (за порогом) нецелесообразно, так как он, как гаситель энергии, никакой пользы не приносит.

При проведении основных опытов был определен коэффициент расхода и для случая истечения из-под шандор (серий IV и VII, см. табл. 14), который в среднем равен 0,62.

Таблица 14

№ серии	Q л/сек.	$\frac{Q}{b\sqrt{2g}}$	Открытие шандор в дм	z в дм	μ
IV	21,03	0,612	1,0	0,96	0,62
VII	29,04	0,846	1,22	1,29	

Для определения величины фильтрации через боковые щели для различных положений щита производились соответствующие замеры, которые показали, что $Q_{\text{фильтр}} = 0,8-1,0$ л/сек.

б) Опыты при пороге № 3.

Координаты порога № 3, вычисленные по формулам 37 и 38 для расхода $Q = 30$ л/сек., первоначально имели следующие данные:

Таблица 15

X см	3,0	5,9	8,60	11,1	13,2	15,0	16,3	16,5	17,0	17,2	17,3
У см	0,4	1,3	2,5	4,2	6,2	8,1	9,7	10,3	9,8	6,5	0,0

Предварительные опыты, произведенные на модели автомата при наличии такого порога, показали, что автоматизм прибора сохраняется, однако, при очень больших напорах (т. е. при высоких горизонтах воды в распределителе), режим в нижнем бьефе выпуска становится бурным и требует установки дополнительных гасителей (расщепителей). В работе автомата наблюдается при этом значительная пульсация расхода.

Ординаты порога № 3 на участке $x = 15-17,3$ см были уменьшены на 2,5—3 см против данных табл. 12 и в окончательном виде имели значения, полностью совпадающие с координатами, вычисленными по формулам 37 и 38.

Таблица 16

X в см	3,0	5,9	8,6	11,1	13,2	15,0	16,3	16,5	17,0	17,2	17,3	18,0
У в см	0,3	1,1	2,4	4,1	6,2	7,4	7,5	7,5	7,4	7,0	0,0	0,0

Такой профиль порога соответствует расчетному расходу автомата $Q = 65$ л/сек. Согласно формуле 49, предел действия автомата будет при $\alpha = 23^\circ$.

При исследовании модели с порогом № 3, построенным согласно данным табл. 16, были проведены 4 серии опытов. Всего опытов было 14.

Первая серия опытов проводилась при высоте оси щита $Y_0 = 21,4$ см и расходе автомата $Q_{\text{ср}} = 15,6$ л/сек. При отдельных опытах расход автомата давал отклонение от среднего на -7 и $+5,7\%$. Разность напоров (z) изменялась от 2,3 до 6,4 см. Шандоры устанавливались на расстоянии 75 см от порога. Пропуск воды в ороситель производился через шандоры и из-под шандор. Расход распределителя во время опытов был $Q_p = 29,4$ л/сек.

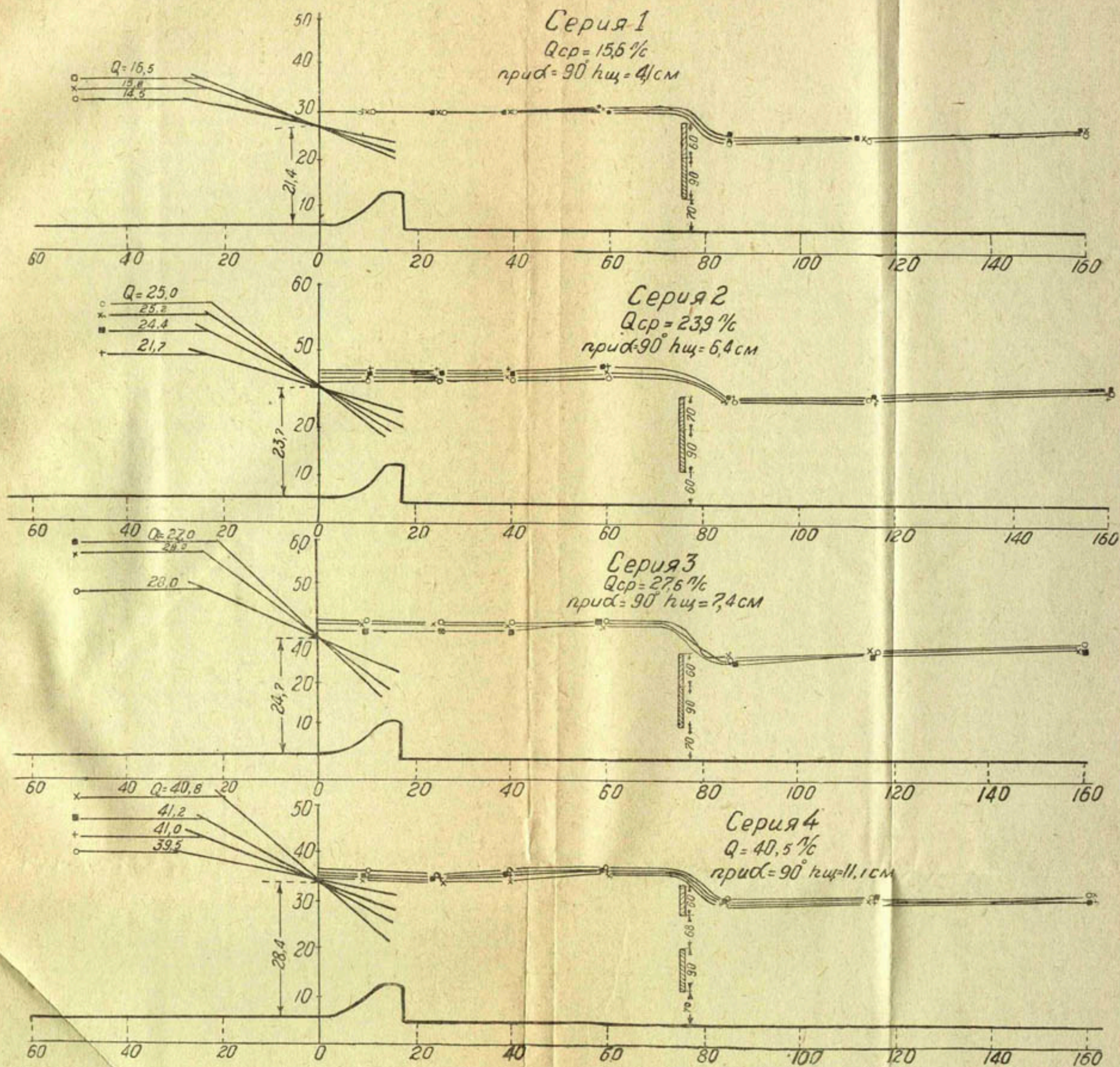


Рис. 13. Опыты на модели водомера-автомата.

Вторая серия опытов проводилась при высоте оси вращения щита $Y_0 = 23,7$ см с расходом автомата $Q_{\text{ср}} = 23,9$ л/сек. Отклонение расходов от среднего при отдельных опытах серии составляло от 8,8 до 5,5%. Такие значительные отклонения, однако, дал лишь опыт № 4, который проводился у предела действия автомата (следует заметить, что вследствие затруднительности учета больших расходов при проведении опытов, данные этого опыта обладают вероятно погрешностью в определении величины расхода выпуска). Если средний расход автомата установить по опытам 5, 6, 7, то процент отклонения от среднего будет значительно меньше, а именно: от -2 до $+0,8\%$. Разность напоров z в опытах изменялась от 3,3 до 16,7 см, а наклон щита — от $\alpha = 20^\circ$ до 43° . Шандоры были установлены на расстоянии 75 см от щита. Вода пропускалась в ороситель (отвод) через шандоры и из-под шандор.

Расход распределителя поддерживался постоянным (28,6 л/сек.). Создание разных напоров, как и во всех опытах других серий, производилось за счет изменения скорости подхода, но не расхода распределителя.

Третья серия опытов производилась при высоте оси вращения щита $Y_0 = 24,7$ см, с расходом автомата $Q_{\text{ср}} = 27,6$ л/сек. При разных опытах замеры расходов дали отклонения от среднего расхода на $+1,4$ и $-2,2\%$. Разность напоров в опытах изменялась от 5,7 до 17,7 см. Наклон щита изменялся от 21 до 46° . Шандоры были установлены на расстоянии 75 см от линии щитов. Пропуск воды в отвод производился через шандоры и из-под шандор. Расход распределителя был постоянным $Q_{\text{распр.}} = 43$ л/сек.

Четвертая серия опытов производилась при высоте оси вращения щита $Y_0 = 24,7$ см с расходом выпуска $Q_{\text{ср}} = 40,5$ л/сек. При разных опытах замеры расходов дали отклонение от среднего на $-2,5$ и $+1,8\%$. Разность напоров z изменялась от 4 до 11 см, а наклон щита — от 12 до 31° . Расход распределителя $Q_p = 48$ л/сек. Шандоры устанавливались на расстоянии 75 см от порога. Пропуск воды в отвод производился через верх шандор, среднее и донное отверстия. Такая установка шандор наиболее целесообразна для наилучшего сопряжения водобоя с отводом.

Во время этих опытов не потребовалось установки гасителей-расщепителей, так как при всех напорах режим воды в нижнем бьефе выпуска был более спокойным, чем при испытании первых трех порогов.

Основные данные, характеризующие опыты на модели № 2 при установке порога № 3, приводятся в табл. 17.

Результаты замеров горизонтов воды в распределителе и выпуске приведены на рис. 13.

Кроме описанных опытов, на модели автомата были произведены дополнительные замеры с целью определения коэффициента расхода μ порога № 3 для случая, когда щит выключен

Основные данные опытов, произведенных на модели водомера-автомата № 2 при установке порога № 3

№ серии	№ опыта	Высота оси от дна лот- ка Y_0 в см	Откры- тие щита при $\alpha =$ 90° $h_{щ}$ в см	Расход автомата Q в л/сек.	Разность напоров z в см	Угол на- клона щита α в граду- сах	Расход распред. $Q_{распр}$ в л/сек.
I	1	21,4	4,1	14,5	2,3	12°	29,4
	2	21,4	4,1	15,8	4,4	18	
	3	21,4	4,1	16,5	5,4	22	
II				$Q_{ср} = 15,6$ л/сек. $q = 0,0623$ м³/сек.			28,6
	4	23,7	6,4	21,8	3,3	20	
	5	23,7	6,4	24,4	8,3	29	
	6	23,7	6,4	25,2	12,9	35	
	7	23,7	6,4	24,5	16,7	43	
				$Q_{ср} = 23,9$ л/сек. $q = 0,0956$ м³/сек.			
III	8	24,7	7,4	28,0	5,7	21°	43,0
	9	24,7	7,4	28,0	14,0	37	
	10	24,7	7,4	27,0	17,7	46	
IV				$Q_{ср} = 27,6$ л/сек. $q = 0,11$ м³/сек.			48,0
	11	28,4	11,1	39,5	4,9	12	
	12	28,4	11,1	40,8	4,19	—	
	13	28,4	11,1	41,0	6,9	23	
	14	28,4	11,1	41,2	11,1	31	
				$Q_{ср} = 40,5$ л/сек. $q = 0,162$ м³/сек.			

и порог работает как затопленный водослив. Обработка полученных опытов показала, что коэффициент расхода при пороге № 3 $\mu = 0,362$ (табл. 18).

Для выяснения автоматизма сооружения при горизонтальном дне выпуска, т. е. без порога, проведены 3 серии опытов (табл. 19).

По данным табл. 19 видно, что при отсутствии порога на дне выпуска водомер не является автоматом с постоянным расходом, так как с изменением наклона щита меняется и расход выпуска.

Таблица 18

№ опыта	Q л/сек. выпуска	b $\sqrt{2g}$	H _п	μ	$\frac{z_1}{H_{п}}$
1	47,0	1,11	0,242	0,357	0,37
2	34,0	1,11	0,194	0,358	0,28
3	29,3	1,11	0,171	0,372	0,27
				$\mu_{ср} = 0,362$	

Примечание. H_п — напор над порогом, z₁ — разность напоров между верхним и нижним бьефом.

Таблица 19

Высота оси от дна в см	Расход рас- пределителя Q _{ср} в л/сек.	Расход вы- пуска Q _{ср} в л/сек.	Разность на- пора z в см
21,9	38,6	24,0	2,0
		25,5	2,5
		29,2	5,5
		29,8	6,0
		32,4	7,5
23,4	49,0	36,0	5,0
		43,0	10,5
		46,0	13,0
24,0	49,0	41,0	7,0
		43,0	8,0
		48,5	13,0

Основные опыты с порогом № 3 показывают:

1. При заданных размерах щита и постоянном профиле порога перемещение оси вращения щита по вертикали вверх или вниз в целях регулирования расхода выпуска практически не нарушает автоматизма водомера. Для данного положения оси вращения щита при всех наклонах щита $\alpha > \alpha_{\max}$ расход выпуска почти не изменяется. Отклонение отдельных расходов выпуска от среднеарифметического составляет около $\pm 2 - 2,5\%$, что надо считать практически вполне приемлемым.

2. При углах наклона щита $\alpha < \alpha_{\max} = 23^\circ$ расход выпуска уменьшается, что вполне согласуется с теорией. Практически пределом действия автомата можно считать наклон щита при $\alpha \approx 10^\circ$. В этом случае минимальный напор будет:

$$z_{\min} = l_n \sin \alpha = l_n \sin \alpha$$

или

$$z_{\min} = 0,1736 l_n \quad (54)$$

3. При заданных элементах щита и постоянном профиле порога расход автомата прямо пропорционален открытию щита при его вертикальном положении (т. е. при $\alpha = 90^\circ$) и определяется по формуле:

$$q = 0,615 \sqrt{2gl_n} b h_{\text{ш}} \quad (55)$$

При сравнении опытного коэффициента $N = \mu \sqrt{\sin \alpha} = 0,615$ формулы 55 с теоретическим коэффициентом $N = \mu \sqrt{\sin \alpha} = 0,613$ формулы 36-а находим близкое совпадение. Результаты подсчетов значений опытного коэффициента расхода и их сравнений с теоретическими для углов $\alpha = 40-90^\circ$ приведены в табл. 20.

Таблица 20

α°	90	80	70	60	50	40
$\mu_{\text{оп}} = \frac{0,615}{\sqrt{\sin \alpha}}$	0,615	0,620	0,636	0,661	0,703	0,768
$\mu_{\text{теор. по ф-ле 35}}$	0,611	0,628	0,649	0,677	0,710	0,748

4. Построение профиля порога на участке $\alpha = 40-90^\circ$ по формулам:

$$y = l_n (1 - \sin \alpha) \quad (52)$$

и

$$x = l_n \cos \alpha \quad (53)$$

как дуги круга с радиусом $R = l_n$, является правильным. Значения координат для построения профиля порога при $\alpha < 40^\circ$ получены опытным путем на модели с порогом № 3 и приведены в табл. 21.

Общая расчетная таблица координат порога при $l_n = 1,00$ в зависимости от угла наклона щита имеет следующий вид:

Таблица 21

α°	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
y_m	0,000	0,015	0,060	0,134	0,234	0,357	0,400	0,410	0,410	0,360
x_m	0,000	0,174	0,312	0,500	0,643	0,766	0,866	0,940	0,984	1,000

Очевидно, что при l_n , отличном от единицы, для получения истинных значений координат порога y и x следует табличные значения умножить на величину l_n .

5. Наилучшим местом для установки шандор является расстояние в 0,75 м от линии щитов, что составляет:

$$l_{ш} = 2,5 z_{\max} = 2,5 l_B. \quad (56)$$

Шандоры лучше всего располагать в виде решетки, т. е. по схеме опытов серии 1—3 с порогом № 3. Нижний бьеф автомата работает тогда вполне спокойно.

Для иллюстрации результатов опытов первой и второй модели приводится график зависимости единичного расхода автомата от открытия щита при $\alpha = 90^\circ$ (рис. 14); как видно из графика, опыты с порогом автомата рассчитаны при $\mu = \text{Const}$ и дают наибольшее отклонение от прямой $q = \alpha h_{ш}$, причем это отклонение особенно заметно при расходах автомата больше расчетного (например серия восьмая, табл. 13).

Совпадение на графике некоторых опытных точек модели с порогом постоянного коэффициента расхода с точками опытов порога переменного коэффициента расхода объясняется почти одинаковой высотой порогов. Резкая крутизна порогов № 1—3 создавала более бурное течение воды в нижнем бьефе автомата и требовала установки дополнительных гасителей энергии (расщепителей), которые одновременно увеличивали коэффициент сопротивления и тем самым давали более устойчивый расход автомата.

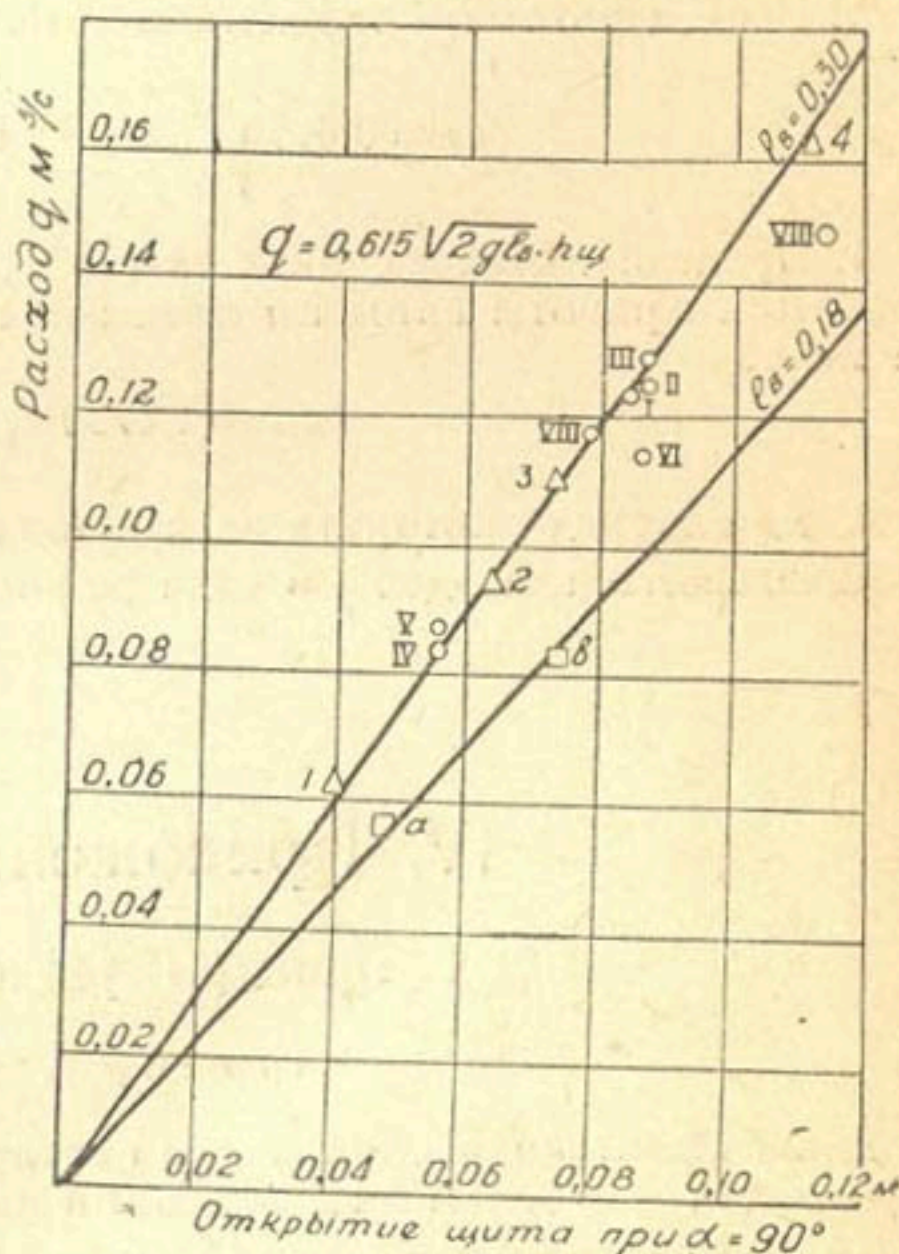


Рис. 14.

4. Общие выводы.

1. Результаты лабораторных исследований полностью подтвердили теоретические предположения о возможности получения постоянного расхода воды в выпуске, независимо от колебаний горизонтов воды в распределителе. Пропуск постоянного расхода воды в выпуск достигается автоматическим регулиро-

ванием отверстия выпуска, благодаря наличию плоского щита, вращающегося на горизонтальной оси, и криволинейного порога на дне лотка выпуска.

2. Расчет размеров щита, в зависимости от заданных горизонтов воды в нижнем бьефе выпуска, определяется по формулам 6 и 18.

3. Расчет порога автомата следует производить с переменным коэффициентом расхода μ . Для построения профиля порога следует пользоваться данными табл. 21.

4. Расход автомата определяется по ф-ле 55 т. е.

$$Q = 0,615 \sqrt{2g l_b b h_{\text{щ}}}$$

5. Пределом наклона щита нужно считать угол $\alpha = 10^\circ$. Для правильной работы автомата минимальный напор должен быть не менее

$$z_{\text{min}} = 0,1736 l_b$$

6. Для зарядки автомата на расстоянии $2,5 l_b$ от линии щита устанавливаются шандоры в виде решетки.

IV. Приложения.

1. Примеры расчета.

Пример 1.

Дается постоянно действующий распределительный канал с глубинами $H_m = 0,50$ м и $H_n = 0,25$ м и выпуск шириною $b = 0,30$ м.

Требуется определить пропускную способность автомата при расположении оси вращения щита на высоте 0,20 м от дна выпуска. По условиям эксплуатации выпуск действует постоянно и не требуется полного закрытия выпуска щитом.

1. Расчет размеров щита.

Максимальная разность горизонтов воды в распределителе составляет:

$$z_{\text{max}} = 0,50 - 0,25 = 0,25 \text{ м} = l_b.$$

Принимая горизонты воды в нижнем бьефе постоянными и находящимися на уровне оси вращения щита, по ф-ле 6 получим размеры плеч щита, а именно:

$$l_n = 0,576 \cdot l_b = 0,576 \cdot 0,25 = 0,144$$

Общая высота щита

$$l_{\text{щ}} = l_{\text{н}} + l_{\text{в}} = 0,144 + 0,25 = 0,394$$

2. Расчет порога автомата.

Координаты порога автомата определяем согласно данным табл. 21, принимая $l_{\text{н}} = 0,144$ м (см. табл. 22).

Таблица 22

α°	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$\frac{Y}{b \text{ м}}$	0,000	0,002	0,009	0,019	0,034	0,051	0,058	0,059	0,059	0,052
$\frac{X}{b \text{ м}}$	0,000	0,025	0,049	0,072	0,093	0,110	0,125	0,135	0,141	0,144

3. Определение пропускной способности автомата при $Y_0 = 0,20$ м.

По формуле 55

$$Q = 0,615 \sqrt{2g l_{\text{в}}} b h_{\text{щ}} = 0,615 \cdot 4,43 \cdot 0,50 \cdot 0,3 h_{\text{щ}} = 0,409 h_{\text{щ}},$$

но $Y_0 = l_{\text{н}} + h_{\text{щ}}$ или $h_{\text{щ}} = Y_0 - l_{\text{н}}$. Подставляя $h_{\text{щ}}$ в формулу (55), найдем $Q = 0,409 (Y_0 - l_{\text{н}})$ или

$$Q = 0,409 (0,20 - 0,144) = 0,409 \cdot 0,056 \cong 0,023 \text{ м}^3/\text{сек.} = 23 \text{ л/сек.}$$

4. Шандоры устанавливаются на расстоянии

$$l_{\text{ш}} = 2,5 z_{\text{max}} = 2,5 \cdot 0,25 = 0,75$$

от линии щитов.

Пример 2.

Дано: максимальная глубина воды в распределителе $H_{\text{max}} = 0,55$ м, ширина прямоугольного лотка выпуска $b = 0,40$ м.

Требуется определить максимальную пропускную способность автомата и необходимые размеры щита для полного закрытия отверстия выпуска в нерабочее время.

1. Расчет размеров щита.

Полная высота щита с запасом над форсированным горизонтом в 0,05 м будет:

$$l_{\text{щ}} = H_{\text{max}} + 0,05 = 0,55 + 0,05 = 0,60 \text{ м.}$$

Принимая горизонт воды в выпуске постоянно находящимся на уровне оси вращения щита, по ф-ле 6 найдем размеры плеч щита

$$l_{\text{н}} = \sqrt{\frac{3}{1 + \eta + \eta^2}} l_{\text{щ}} = \sqrt{\frac{3}{1 + 0 + 0}} l_{\text{щ}} = 1,735 l_{\text{щ}} \text{ или } l_{\text{н}} = 0,576 l_{\text{в}}.$$

Вся высота щита

$$l_{\text{ш}} = l_{\text{н}} + l_{\text{в}}.$$

Подставляя значение $l_{\text{н}}$, найдем:

$$l_{\text{ш}} = 0,576 l_{\text{в}} + l_{\text{в}} = (0,576 + 1) l_{\text{в}} = 1,576 l_{\text{в}},$$

откуда высота верхнего плеча

$$l_{\text{в}} = \frac{l_{\text{ш}}}{1,576} = \frac{0,60}{1,576} = 0,38 \text{ м.}$$

Высота нижнего плеча

$$l_{\text{н}} = l_{\text{ш}} - l_{\text{в}} = 0,60 - 0,38 = 0,22 \text{ м.}$$

2. Расчет порога автомата.

Согласно данным табл. 21, при высоте нижнего плеча щита $l_{\text{н}} = 0,22$ м, в зависимости от угла наклона, координаты порога будут (см. табл. 23):

Таблица 23

α°	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Y в м	0,000	0,003	0,012	0,030	0,052	0,078	0,088	0,090	0,090	0,078
X в м	0,000	0,037	0,075	0,110	0,141	0,171	0,190	0,207	0,216	0,220

3. Пределы поднятия и опускания оси вращения щита.

Нижний предел опускания оси щита будет $Y_{\text{н}} = l_{\text{н}} = 0,22$, т. е. при вертикальном положении щита и опущении до дна ($Q = 0$).

Верхний предел поднятия оси щита находится из условий максимальных горизонтов воды в распределителе с вычетом минимального напора автомата, т. е.

$$Y_{\text{в}} = H_{\text{max}} - z_{\text{min}} = 0,55 - \sin 10^\circ \cdot 0,38 = 0,55 - 0,056 = 0,494$$

4. Максимальная пропускная способность автомата определится из ф-лы 55. Подставляя все известные величины, будем иметь:

$$Q = 0,615 \sqrt{2g l_{\text{в}}} b h_{\text{ш}} = 0,615 \cdot 4,43 \sqrt{0,38} \cdot 0,40 h_{\text{ш}} = 0,67 h_{\text{ш}},$$

но $Y_{\text{ов}} = h_{\text{ш}} + l_{\text{н}}$ или, подставляя значение $h_{\text{ш}}$, найдем Q_{max} :

$$Y_{\text{ов}} = \frac{1}{0,67} Q + l_{\text{н}},$$

откуда

$$Q_{\text{max}} = (Y_{\text{ов}} - l_{\text{н}}) \cdot 0,67 = (0,494 - 0,22) \cdot 0,67 = 0,274 \cdot 0,67 = 0,184 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

5. Шандоры устанавливаются от линии щита на расстоянии

$$l_{\text{ш}} = 2,5 z_{\text{max}}^- = 2,5 (H_{\text{max}} - l_{\text{н}}) = 2,5 (0,55 - 0,22) = 2,5 \cdot 0,23 = 0,557;$$

кругло $l_{\text{ш}} = 0,55$ м.

6. Длину крепления за линией шандор принимаем

$$l_{\text{крепл}} = 3 h = 3 Y_{\text{ов}} = 3 \cdot 0,494 \cong 1,50 \text{ м.}$$

Пример 3.

Максимальная глубина воды в распределителе составляет $H_{\text{max}} = 1,5$ м, а нормальная глубина — $H_{\text{н}} = 1,4$ м. Ширина выпуска $b = 0,50$ м.

Требуется так рассчитать элементы автомата, чтобы при нормальных горизонтах воды в распределителе обеспечивался выпуск расхода $Q = 0,050$ м³/сек., а при максимальных горизонтах — $Q = 0,100$ м³/сек.

Кроме того, требуется найти такие размеры щита, при которых возможно в случае необходимости полностью закрыть все отверстия выпуска.

1. Определяем необходимые напоры для обеспечения выпуска расходами 0,050 и 0,100 м³/сек. при условии отсутствия щита автомата и при работе порога, как затопленного водослива.

Для $Q = 0,050$ м³/сек. будем иметь:

$$H_{\text{н}} = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}}\right)^2} = \sqrt[3]{\left(\frac{0,050}{0,362 \cdot 0,50 \cdot 4,43}\right)^2} = 0,158$$

Кругло: $H_{\text{н}} = 0,16$ м

Для $Q = 0,100$ м³/сек. будем иметь:

$$H_{\text{н}} = \sqrt[3]{\left(\frac{0,100}{0,362 \cdot 0,50 \cdot 4,43}\right)^2} = 0,25.$$

Для правильной работы автомата увеличим этот напор на 0,05 м. Тогда:

$$H_{\text{н}} = 0,25 + 0,05 = 0,30 \text{ м.}$$

2. Определяем размеры щита.

По условиям задачи высота щита должна обеспечивать полное закрытие отверстия выпуска в рабочее время, т. е.

$$l_{\text{ш}} = 0,30 + Y_{\text{max}},$$

где Y_{max} — максимальная ордината порога автомата, пока неизвестная.

В первом приближении допустим $Y_{\max} = 0,06$ м.

Тогда :

$$l_{\text{ш}} = 0,30 + 0,06 = 0,36 \text{ м.}$$

Принимая горизонты воды в выпуске на уровне оси вращения щита, получим размеры плеч

$$l_{\text{ш}} = l_{\text{в}} + l_{\text{н}} = l_{\text{в}} + 0,576 l_{\text{в}} = 1,576 l_{\text{в}},$$

откуда высота верхнего плеча $l_{\text{в}} = 0,23$ м,

высота нижнего плеча $l_{\text{н}} = 0,13$ м.

Согласно табл. 21, максимальная ордината порога при $l_{\text{н}} = 0,13$ м будет:

$$Y_{\max} = 0,41 \cdot 0,13 = 0,053 \text{ м.}$$

Как известно, максимальная глубина слоя воды, переливающегося через порог автомата, определена в $H_{\text{н}} = 0,30$ м. Прибавляя к ней $Y_{\max} = 0,053$, получим величину необходимой высоты щита, а именно:

$$l_{\text{ш}} = 0,30 + 0,053 = 0,353 \text{ м.}$$

Выше высота щита была принята равной 0,36 м.

3. Расчет порога.

Согласно данным табл. 21, координаты порога при $l_{\text{н}} = 0,13$ м будут таковы (см. табл. 24).

Таблица 24

α°	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$y_{\text{в м}}$	0,000	0,002	0,008	0,017	0,03	0,046	0,052	0,053	0,053	0,047
$x_{\text{в м}}$	0,0	0,023	0,044	0,065	0,083	0,100	0,112	0,122	0,127	0,130

4. Проверка пропускной способности автомата.

Нижний предел опускания оси вращения щита будет при $Q = 0$, т. е. $Y_{\text{он}} = l_{\text{н}} = 0,13$ м, а верхний предел подъема оси вращения щита будет:

$$Y_{\text{ов}} = H_{\text{н}} + Y_{\max} - z_{\min} = 0,30 + 0,053 - \sin 10 l_{\text{в}} = 0,353 - 0,1736 \cdot 0,23 = 0,353 - 0,04 = 0,313.$$

Подставляя все известные величины в ф-лу 55 расхода автомата, будем иметь:

$$h_{\text{ш}} = \frac{Q}{0,615 \cdot 0,50 \cdot 4,43 \sqrt{0,23}} = 1,68 Q$$

Высота оси щита:

$$Y_0 = h_{\text{ш}} + l_n = 1,80 Q + 0,13$$

Теперь нетрудно для каждого заданного расхода определить высоту поднятия оси щита:

Таблица 25

Q м³/сек	0,050	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100
Y ₀	0,22	0,238	0,256	0,274	0,292	0,31

5. Согласно формуле 56, шандоры должны быть расположены на расстоянии 2,5 максимального напора от линии щита, т. е.

$$l_{\text{ш}} = 2,5 \quad z_{\text{max}} = 2,5 \quad l_{\text{в}} = 2,5 \cdot 0,23 = 0,575 \text{ м.}$$

Кругло принимаем 0,60 м.

Длину крепления за линией шандор принимаем конструктивно равной трехкратной глубине максимального расхода выпуска, а именно:

$$l_{\text{крепл}} = 3 \cdot 0,31 = 0,93 \text{ м. Кругло } l_{\text{крепл}} = 1,00 \text{ м.}$$

Таким образом, мы получили:

1. Размеры щита

Полная высота щита $l_{\text{ш}} = 0,36 \text{ м.}$

Высота верхнего плеча $l_{\text{в}} = 0,23 \text{ м.}$

Высота нижнего плеча $l_{\text{н}} = 0,13 \text{ м.}$

2. Максимальная высота порога $Y_{\text{max}} = 0,053 \text{ м.}$

3. Глубина заложения дна выпуска от максимального горизонта воды в распределителе

$$H_{\text{max}} = 0,30 + 0,053 = 0,353 \text{ м.}$$

4. Величина минимального напора $z_{\text{min}} = 4 \text{ см.}$

5. Место расположения шандор $l_{\text{ш}} = 0,60 \text{ м.}$

6. Длина крепления за шандорами $l_{\text{крепл}} = 1,00 \text{ м.}$

Пример 4.

Максимальная глубина воды в распределителе $H_{\text{max}} = 0,95 \text{ м,}$ а нормальная глубина $H_{\text{н}} = 0,50 \text{ м.}$ Средняя скорость в распределителе — около $0,50 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Требуется так рассчитать размеры автомата, чтобы, с одной стороны, в нерабочее время полностью закрывалось отверстие выпуска щитом-регулятором, а с другой стороны — обеспечивался забор воды из распределителя в выпуск в количестве

$Q = 0,200 \text{ м}^3/\text{сек.}$ при нормальных горизонтах глубины воды в канале, т. е. $H_n = 0,50 \text{ м.}$ Кроме того, требуется установить возможные пределы регулирования расхода выпуска в зависимости от высоты расположения оси вращения щита.

1. Расчет размеров щита.

Очевидно, для полного закрытия отверстия выпуска, высота щита должна быть по крайней мере не менее глубины $H_{\max} = 0,95 \text{ м.}$ Однако, берем над форсированным горизонтом еще запас в 5 см и получаем общую высоту щита

$$l_{\text{щ}} = 0,95 + 0,05 = 1,00 \text{ м.}$$

Принимая горизонты воды в нижнем бьефе постоянными и находящимися на уровне оси вращения щита, т. е. $\eta = 0$, по ф-ле 6 будем иметь $l_n = 1,735 l_v$ или $l_n = 0,576 l_v$.

Тогда общая высота щита

$$l_{\text{щ}} = l_n + l_v = 1,576 l_v$$

Но, как известно, $l_{\text{щ}} = 1,00 \text{ м,}$ тогда $l_v = \frac{1,00}{1,576} = 0,634$ и $l_n =$

$$= 0,634 \cdot 0,576 = 0,366.$$

Следовательно, мы имеем: общую высоту щита $l_{\text{щ}} = 1,00 \text{ м,}$ высоту верхнего плеча $l_v = 0,634$, высоту нижнего плеча $l_n = 0,366 \text{ м.}$

2. Расчет порога.

Согласно данным табл. 21, координаты порога при $l_n = 0,366 \text{ м}$ будут таковы (см. табл. 26).

Таблица 26

α°	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
y в м	0,00	0,06	0,022	0,049	0,086	0,130	0,146	0,150	0,150	0,132
x в м	0,00	0,064	0,125	0,183	0,237	0,280	0,317	0,344	0,360	0,366

По табл. 26 находим максимальную ординату порога $Y_{\max} = 0,150 \text{ м} = 15 \text{ см.}$

3. Определение ширины выпуска автомата.

Теперь, определив высоту порога в 15 см, по формуле затопленного водослива найдем необходимую ширину выпуска для расхода $Q = 200 \text{ л/сек.}$ при $H_n = 0,50 \text{ м.}$

Согласно нашим опытам, коэффициент расхода при затопленном пороге (см. табл. 18) составляет около $m = 0,362$. Тогда при глубине переливающегося слоя воды через порог $H_n = H_n -$

— $Y_{\max} = 0,50 - 0,15 = 0,35$ м; единичный расход выпуска выразится в следующем:

$$q = m \sqrt{2g} H_n^{3/2} = 0,362 \cdot 4,43 \cdot 0,35 \sqrt{0,35} = 0,333 \text{ м}^3/\text{сек.},$$

откуда ширина выпуска

$$b = \frac{Q}{q} = \frac{0,200}{0,333} = 0,60 \text{ м.}$$

4. Предел поднятия и опускания оси вращения щита.

Нижний предел опускания оси вращения щита будет при $Q = 0$, т. е. при $Y_{\text{он}} = l_n = 0,366$ м.

Верхний предел поднятия оси щита будет равен $H_{\max}$ [минус величина минимального напора, необходимого для правильной работы автомата, а именно:

$$z_{\min} = 0,1736 \cdot 0,634 = 0,11 \text{ м}$$

Тогда

$$Y_{\text{он}} = H_{\max} - z_{\min} = 0,95 - 0,11 = 0,84 \text{ м}$$

5. Определение пропускной способности автомата.

Теперь, пользуясь общей формулой для определения расхода для различных положений оси вращения щита, найдем соответствующий расход выпуска, или наоборот, для заданного расхода выпуска найдем высоту оси вращения щита. Все подсчеты сведены в табл. 27: $Q = 0,615 b \sqrt{2g l_n} h_{\text{щ}}$, где $h_{\text{щ}}$ — открытие выпуска при вертикальном положении щита.

Следовательно, ось щита будет находиться на высоте

$$Y_o = h_{\text{щ}} + l_n.$$

Подставляя все известные величины в формулу, будем иметь

$$h_{\text{щ}} = \frac{Q}{0,615 \cdot 0,60 \cdot 4,43 \sqrt{0,634}} = 0,77 Q$$

или

$$Y_o = 0,77 Q + 0,336 \text{ м.}$$

Теперь, задаваясь различными значениями Q , находим соответствующее значение Y_o (см. табл. 27).

Таблица 27

Q м³/сек.	0,050	0,100	0,150	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600
Y _o в м	0,40	0,44	0,48	0,52	0,60	0,67	0,75	0,83

Из таблицы видно, что максимальная пропускная способность автомата при принятых размерах щита и ширине выпуска достигает 600 л/сек.

6. В соответствии с ф-лой 51 шандоры для регулирования горизонтов воды в нижнем бьефе автомата располагаем от линии щитов на расстоянии

$$l_{ш} = 2,5 l_v = 2,5 \cdot 0,634 \cong 1,60 \text{ м.}$$

7. Длину крепления рисбермы (за линией шандор) принимаем равной трехкратной глубине выпуска при его максимальном расходе, т. е.

$$l_{крепл} = 3 \cdot 0,83 = 2,49 \text{ м.}$$

Кругло принимаем $l_{крепл} = 2,50$.

По произведенному расчету составлен проект сооружения (см. рис. 15).

2. Описание конструкции водомера-автомата с вращающимся щитом*.

Водомер-автомат с вращающимся щитом, как всякое гидротехническое сооружение, состоит из двух частей — основной и подвижной.

К основной части сооружения относятся прямоугольный лоток выпуска с отводящим и подводящим участками и криволинейным порогом специальной формы, установленным на дне лотка выпуска.

Все элементы основной части сооружения связаны с подземным (подземный контур) и наземным потоками.

К подвижной части сооружения относятся свободно вращающийся плоский щит с подъемным механизмом, а также шандоры для регулирования горизонтов воды в нижнем бьефе автомата и решетки для защиты автомата от попадания в него плавающих предметов.

Описание основной части автомата.

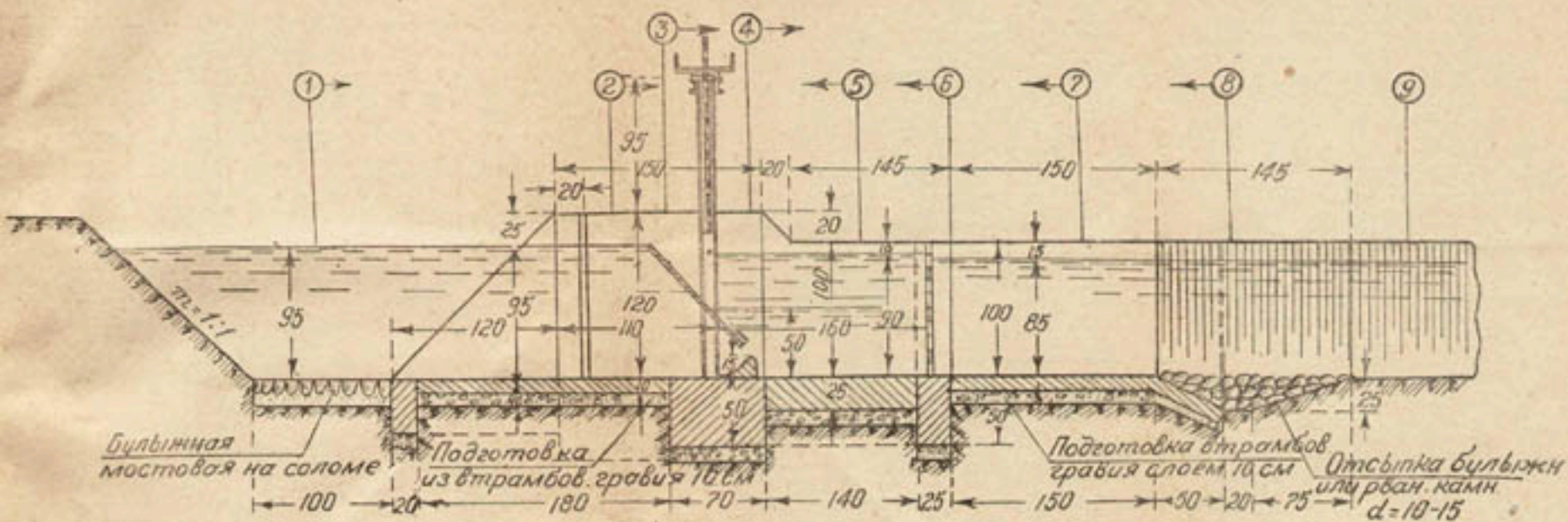
Лоток выпуска состоит из крепления по дну (флютбета) и боковых стенок (устоев).

Флютбет состоит из трех частей: понура, водобоя и рисбермы.

Понурная часть представляет собою укрепленное дно лотка выпуска выше оси сооружения (линии щитов) на $l_n \cong 2 H_n$; назначение ее — удлинить путь подземного потока и предохранить

* Описание конструкции дается для сооружения, рассчитанного на пропуск расходов от 100 до 1000 л/сек.

Разрез по оси водомера



План

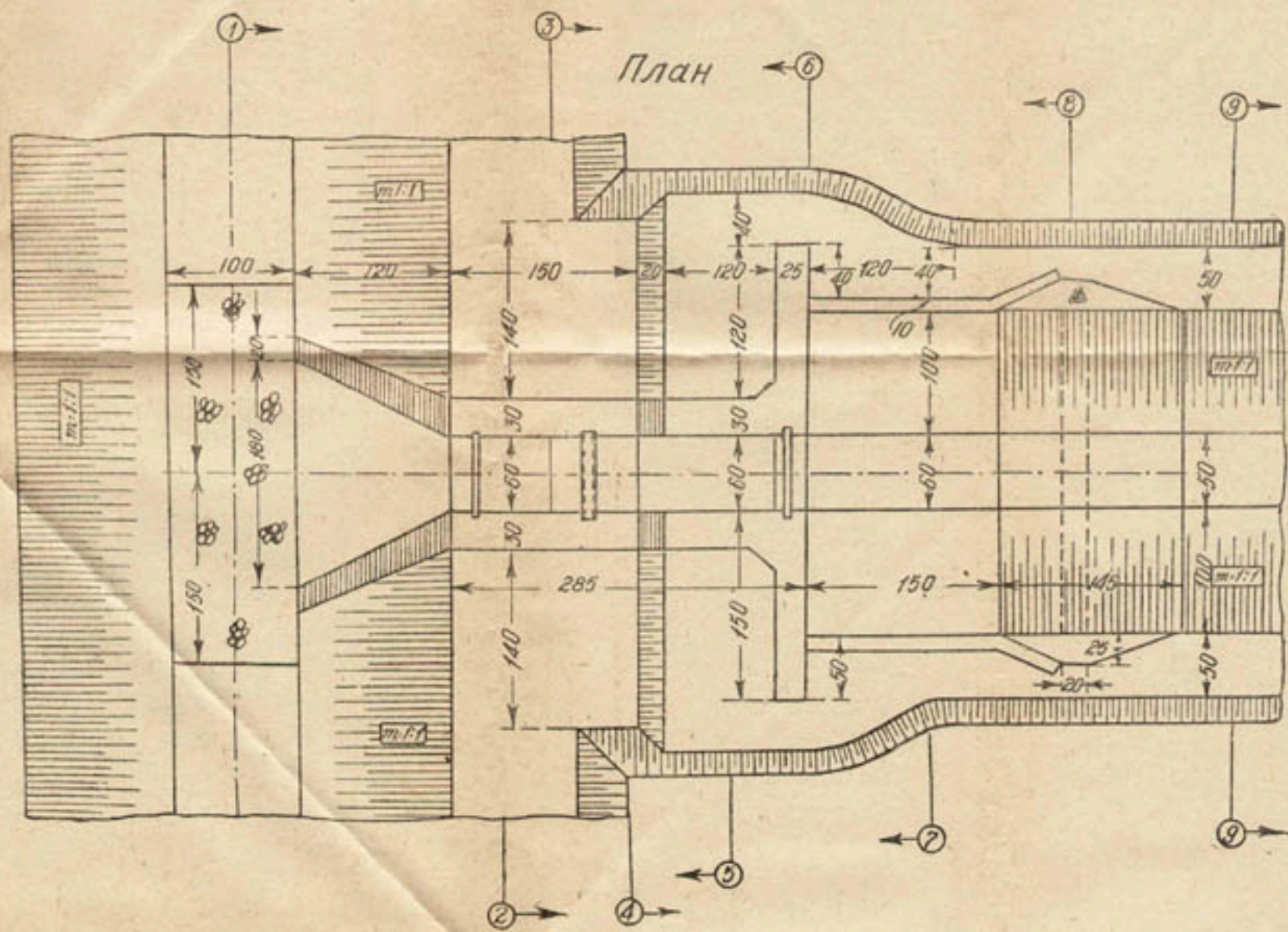


Рис. 15.

ПОДСЧЕТ ОБЪЕМА БЕТОННЫХ РАБОТ.

Часть соору- жения	Элементы сооружения	Состав бетона	Единица измерения	Количество
Понур	Косые стенки	1:3:6	м³	0,07
	Дно понура	—	·	0,22
	Зуб	—	·	0,13
	Боковые стенки	—	·	1,62
Водобой	Порог	1:2:4	·	—
	Фундамент порога	1:3:6	·	0,21
	Боковые стенки	—	·	1,31
	Обратные стенки	—	·	1,12
Сливная часть	Дно водобоя	—	·	0,21
	Зуб	—	·	0,08
	Дно	—	·	0,12
	Откосы	—	·	0,33
Итого:		—		6,03

ЭКСПЛИКАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ.

№ п/п	Наименование деталей	Размер или марка	Коли- чество	Вес единицы вес в кг.	Общий
1	Вращающийся щит с подъем- ной рамой	600 × 1000	1 шт.	87,11	87,11
2	Пазовая рама с анкерным при- способлением	600 × 2350	·	103,22	103,22
3	Винт подъемного механизма	Ø = 35 l = 1000	·	19,0	19,0
4	Подъемный механизм подтяжки Самсипровода	n = 1	·	14,0	14,0
Итого вес ме- таллической конструкции				—	223,33 кг

ПОДСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ.

Часть сооружения	Элементы	Единица измерения	Количество
Понур	Крепление дна	м³	3,00
Сливная часть	Зуб, дно и откосы	м³	0,72

Поперечные разрезы

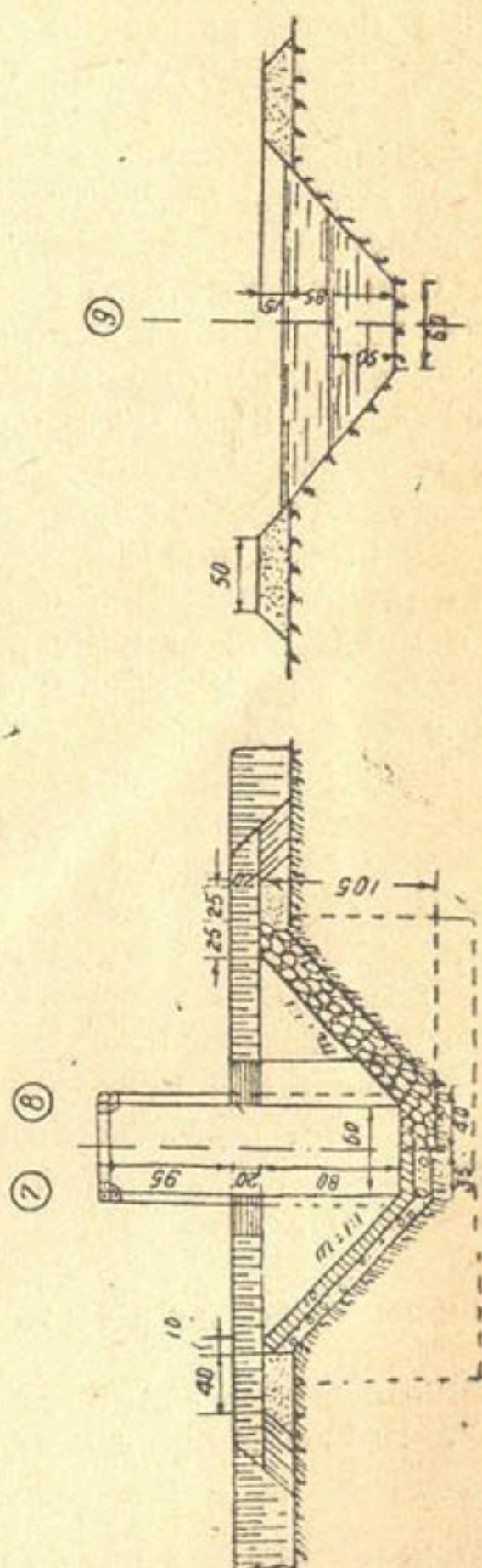
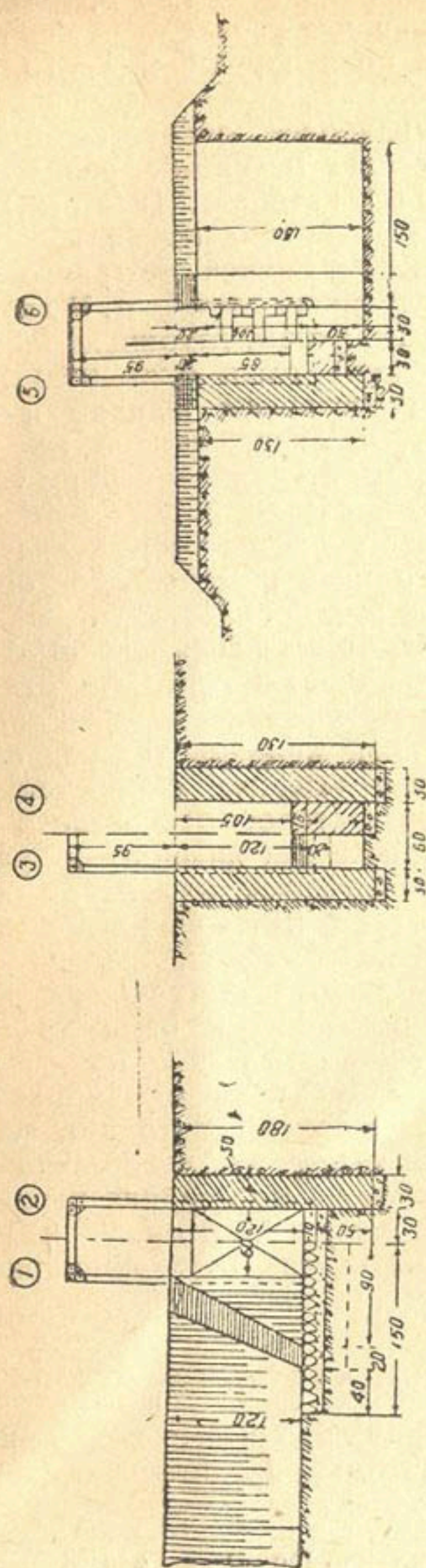


Рис. 16.

от размывов дно перед сооружением. Обычно понур заканчивается верхним зубом, глубиной 0,30—0,50 м. Выше понура производится легкое крепление дна распределителя в виде булыжной отмостки. Толщина пола понурной части берется в 8—10 см.

Водобойная часть, как наиболее ответственный участок сооружения, представляет собою массивное крепление дна в месте устройства щита и порога автомата. В этом месте скорости течения воды и нагрузка, приходящаяся на дно сооружения, бывают наибольшими. Под линией щитового механизма устраивается основной зуб, глубиной до 0,50 м. У линии шандор водобой заканчивается третьим зубом, глубиной 0,30—0,50 м. Толщина пола примерно должна быть 0,20—0,30 см. Длина водобоя определяется местоположением шандор и находится по ф-ле $l_{ш} = 2,5l_n = 2,5 z_{max}$. За линией щитов на дне лотка устанавливается порог автомата, рассчитываемый по табл. 21 для заданной высоты (l_n) нижнего плеча щита.

Не менее ответственной частью сооружения является рисберма. Она располагается за линией шандор и состоит из двух частей — водонепроницаемой и водопроницаемой. Длина первой принимается примерно равной трем форсированным глубинам выпуска ($l_{рисб} = 3 h_{вып}$), а водопроницаемой — около одной глубины. Таким образом, общая длина рисбермы примерно должна быть около $l_{рисб} = 4 h_{вып}$. Толщина пола принимается равной 8-10 см. Основное назначение рисбермы — гашение скоростей, образующихся при прохождении через щитовое отверстие и шандоры, а также предохранение от размыва дна нижнего бьефа.

Боковые стенки (устои) сопрягаются в верхнем и нижнем бьефах с естественными откосами каналов распределителя и отвода либо посредством ныряющих стенок, либо косыми плоскостями. В боковых устоях (у входа в выпуск), на расстоянии не менее l_n от линии щита, оставляются пазы для закладки шандор (на случай ремонта автомата).

У линии щита в устьях выпуска втапливаются швеллеры для укладки рамовой конструкции со щитом автомата и, наконец, для укладки шандор в нижнем бьефе на расстоянии $2,5 l_n$ от оси вращения щита устраиваются пазы. Глубина первого и второго ряда пазов должна быть равной 5—6 см.

Общая длина прямоугольной части лотка примерно составляет около $3H$.

Описание подвижной части сооружения.

Основное место занимает щит автомата с подъемным механизмом*. Вращающийся щит автомата представляет собой прямо-

* При малых расходах выпуска до $Q = 100$ л/сек. конструкция щита и подъемного механизма может быть выполнена примерно так, как это было сделано для лабораторных условий (см. рис. 9).

СПЕЦИФИКАЦИЯ

№№ п/п	Наименование элементов	Материал	ОСТ	Сортимент		Длина в мм	Число	Единица измере- ния	Общее количе- ство	Вес еди- ницы из- мерения в кг	Общий вес в кг	
				сечение	размеры							
1	Подъемная рама	Ригель	железо	6159	№ 8	—	700	1	пог. м	0,700	8,04	5,62
2		Стойки	"	14	—	75×50×8	1093	2	"	2,186	7,43	16,2
3		Схватки	"	13	—	50×8	600	2	"	1,200	3,14	3,76
4		Упорн. кронштейн	"	13	—	50×8	490	2	"	0,980	3,14	3,07
5		Упорный уголок	"	14	№ 5	—	120	1	"	0,240	3,77	0,45
6		Косынки	"	13	—	100×100×8	—	2	кв. м	0,640	6,28	4,02
7		Соединит. уголок	"	14	№ 5	—	60	2	пог. м	0,120	3,77	0,45
8		Заклепки	"	—	Ø = 9 ¹ / ₂	—	27	2	"	0,06	0,56	0,04
		Заклепки	"	—	Ø = 13 ¹ / ₂	—	31	18	"	0,56	1,12	0,63
									Итого:	—		34,69
9	Вращ. щит	Лист щита	железо	19	—	595×1000×6	—	1	кв. м	0,595	47,10	28,1
10		Ось	"	9	—	30×30	600	1	пог. м	0,600	7,07	4,24
11		Соединит. стойка	"	14	№ 5	—	1050	1	"	1,050	3,77	3,96
12		Противовес	"	19	—	595×180×6	—	3	кв. м	0,322	47,10	15,52
13		Заклепки	"	—	Ø = 9 ¹ / ₂	—	27	8	пог. м	0,24	0,56	0,11
		Заклепки	"	—	Ø = 13 ¹ / ₂	—	31	14	"	0,44	1,12	0,49
									Итого:	—		52,42
14	Пазовая рама	Верхний ригель	железо	6159	№ 10	—	716	2	пог. м	1,432	10,00	14,32
15		Стойки рамы	"	6159	№ 10	—	2358	2	"	4,716	10,00	47,16
16		Донный швеллер	"	6159	№ 10	—	620	1	"	0,620	10,00	6,20
17		Косынка верхн. узла	"	13	—	140×110×8	—	4	кв. м	0,062	62,8	3,91
18		Косынка нижн. узла	"	13	—	110×110×8	—	4	"	0,048	62,8	3,02
19		Пазовый уголок	"	14	—	45×30×6	1500	2	пог. м	3,000	3,28	9,84
20		Анкера	"	13	—	80×6	—	4	шт.	4	4,20	16,80
21		Болты с гайками	"	—	Ø = 20	—	—	4	"	4	0,34	1,36
22		Заклепки	"	—	Ø = 9 ¹ / ₂	—	27	16	пог. м	0,43	0,56	0,24
		Заклепки	"	—	Ø = 13 ¹ / ₂	—	31	10	"	0,31	1,12	0,37
									Итого:	—		103,22
									Итого по щиту с рамой			190,33

угольный лист из котельного железа, толщиной до 6 мм. Осью вращения щита служит нижняя кромка рамы, к которой он прикреплен шарнирно. Сама рама снабжена ручным подъемным механизмом и может с помощью его двигаться по вертикали вверх и вниз. С опусканием оси вращения щита (а следовательно, и рамы) расход автомата уменьшается, а с поднятием — увеличивается.

Размеры щита определяются из условия полного закрытия отверстия выпуска.

Размеры плеч щита определяются по формулам 6 или 18 в зависимости от заданных условий работы нижнего бьефа автомата. Для определения расхода воды к раме прикрепляется проградуированная рейка.

Рейка градуируется по ф-ле 55.

Для приведения щита в вертикальное положение к концу верхнего плеча прикрепляется кольцо или крючок, в средней перекладине рамы заранее делается отверстие, в которое должны заходить кольцо или крючок, после чего они закладываются засовом; это удерживает щит в вертикальном положении.

Чтобы предотвратить опрокидывание щита в сторону верхнего бьефа, необходимо консольно прикрепить по краям рамы два кронштейна, которые и удержат щит под углом $\alpha = 5 - 10^\circ$.

Для нормальной работы автомата требуется со стороны нижнего плеча уравнивать щит дополнительным грузом. Груз в виде полосового железа прикрепляется к щиту.

К подвижной части сооружения относятся также деревянная решетка или направляющая шпорка, устанавливаемые у входа в выпуск для отгона плавающего мусора, а также деревянные брусья-шандоры в нижнем бьефе, назначение которых поддерживать горизонты воды на уровне оси вращения щита.

3. Указания к постройке сооружения.

Сооружение возможно выполнять как из бетона, так и из жестких материалов (кирпичная кладка, дерево). При производстве работ необходима тщательность выполнения и точное соблюдение всех проектных размеров. В особенности необходимы они при выполнении наиболее ответственных частей сооружения, каковыми являются порог и прямоугольный лоток в пределах вращения щита.

Порог может быть выполнен как из высококачественного бетона, так и из хорошего (твердого) дерева; в последнем случае, во избежание разбухания, порог должен быть до установки на место тщательно проолифен. В обоих случаях порог должен заготавливаться отдельно с точным соблюдением формы очертания по табл. 21.

Порог устанавливается на место после предварительного выравнивания дна лотка под нивелир. Бетонные работы и штукатурка в пределах порога и вращения щита обязательно должны

производиться под шаблон. Вертикальные стенки лотка, в пределах вращения щита, должны выполняться строго-вертикальными с точным соблюдением ширины лотка в свету. Внутренняя (обращенная к лотку) их поверхность должна быть тщательно выглажена (штукатурка с железнением, остружка).

Подвижная часть сооружения — щит — должна быть выполнена из железа и в очень редких случаях — из дерева (предпочтительно железный).

В обоих случаях желательно изготовлять щит в мастерской с привлечением наиболее квалифицированной рабочей силы. Вращающийся щит должен быть строго прямоугольным, уравновешенным и свободно вращаться на оси.

Для беспрепятственного вращения в сооружении щит должен быть уже щитового отверстия на 3—5 мм.

Вращение щита должно происходить строго в вертикальной плоскости.

Подъемная рама, во избежание перекоса щита в пазах, должна плотно входить в пазы рамы подъемника.

В остальном производство работ по сооружению водомера ничем не отличается от производства работ мелких сооружений на сети обычного типа.

4. Указания к эксплуатации водомера-автомата.

Водомер-автомат, как прибор для измерения и регулирования расхода (и стока) воды в колхозных створах, требует тщательного ухода и бережного отношения. Поэтому для нормальной и бесперебойной работы водомера необходимо:

1. Предохранять выпуск от попадания в него плавающих тел, могущих нарушить нормальную работу щита. Это достигается либо установкой у входа в выпуск деревянной решетки, либо устройством у верхней грани входного откоса ограждающей стенки (шпорки);

2. Держать под замком подъемный механизм;

3. Предохранять пазовые конструкции и ось щита от загрязнения, производя периодическую очистку их от попавшего мусора;

4. Допускать к регулированию расхода только определенных лиц, в ведении которых находится водораспределение участка, причем новые должностные лица должны предварительно ознакомиться с особенностями устройства и конструкции сооружения;

5. Периодически проверять правильность положения рейки со шкалой расхода выпуска, а также градуировку шкалы (место нуля и пр.);

6. Определять сток воды простым умножением постоянного расхода автомата на время работы выпуска. Для определения стока воды необходимо иметь журнал водомера с указанием в нем даты, положения оси щита и его основных размеров;

7. Для поддержания горизонтов в нижнем бьефе автомата следует иметь необходимое число шандор и запасных спиц;

8. Производить периодическую очистку лотка выпуска от заиления;

9. Не реже одного раза в 10 дней осматривать автомат;

10. Всякий ремонт автомата производить лишь с разрешения Системного управления и выполнять лишь при наличии технического наблюдения и контроля.

Основные эксплуатационные мероприятия водомера остаются такими же, как и у всех других сооружений подобной величины и характера.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
I. Введение.	3
II. Принцип действия водомера-автомата с вращающимся щитом и порядок расчета.	
1. Принцип действия	5
2. Расчет размеров щита	—
3. Расчет порога автомата	10
4. Примеры расчета.	19
5. Выводы	24
III. Испытание водомера-автомата с вращающимся щитом в лабораторных условиях.	
1. Задачи лабораторных исследований.	25
2. Описание модели и методика производства опытов	26
3. Краткое описание опытов и их результаты.	27
4. Общие выводы ;	41
IV. Приложения.	
1. Примеры расчета	42
2. Описание конструкции водомера-автомата с вращающимся щитом	50
3. Указания к постройке сооружения	53
4. Указания к эксплуатации водомера-автомата	54

Редактор А. И. Алексеев.

Подписано к печати 6/II-41 г. Печати. л. 3,5+5 вклеек. В 1 печ. л. 45697 зн.
Уч. авт. л. 5,18. Тираж 1000. Р. 431. Цена 5 р.

Узполиграфкомбинат. Ташкент. 1941. Заказ № 3873.