

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ, КАНАЛИЗАЦИИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ
ВОДГЕО

В О П Р О С Ы ГИДРОТЕХНИКИ

1934
МОСКВА

НКТП — ГЛАВСТРОЙПРОМ — СССР

Всесоюзный научно-исследовательский институт
водоснабжения, канализации, гидротехнических
сооружений и инженерной гидрогеологии
„ВОДГЕО“

Вопросы гидротехники

1934
МОСКВА

Отв. редактор проф. М. М. Гришин. Техред. С. С. Григорьев.

Сдано в производство 28/II 1934 г. Подписано к печати 7/VI 1934 г.
Уполн. Главлита № В-88318. Тираж 1.100 экз. Колич. печ. лист. 13 $\frac{3}{4}$.
Заказ № 1112. Колич. зн. в печ. листе 49 000. Форм. бум. 62 X 88/16.

1-я Образцовая типография Огиза РСФСР треста «Полиграфкнига».
Москва, Валовая, 28.

Отпечатано с матриц в тип. «Гудок», Москва, ул. Станкевича, 7.
Заказ № 4940.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Помещая в настоящем сборнике ряд работ научных сотрудников, неопубликованных отдельными изданиями, Институт „Водгео“ имеет своей целью ознакомить широкую советскую гидротехническую общественность с работами своего гидротехнического сектора, профиль которого сводится к разрешению ряда задач, стоящих перед современной гидротехникой.

Помещенные ниже работы проф. Покровского Г. И. и его ближайшего сотрудника Иоффе А. Я. по моделированию земляных сооружений (в частности, плотин) при помощи центрифуги, установленной в лаборатории механики грунтов, и по другим вопросам инженерного грунтоведения призваны сыграть немаловажную роль не только в гидротехнике, но и в других отраслях строительства.

Идея применения центробежной машины к экспериментальному исследованию моделей земляных сооружений, впервые реализованная Институтом „ВОДГЕО“ по инициативе проф. Покровского Г. И., оказалась весьма ценной, а самый метод, после его тщательного анализа, способным принести ряд практических результатов.

Задача Института в области этого изобретения в настоящий момент заключается в необходимости перенесения опытов моделирования на центрифуге в полевую обстановку на строительство. К сожалению, инициатива строительства канала Москва—Волгострой осуществить у себя установку центрифуги под руководством Водгеоинститута по независящим от Института обстоятельствам осталась пока нереализованной.

Помимо указанной выше работы Институт в своей лаборатории механики грунтов разрабатывает ряд других тем, как то: исследование трения в грунтах на приборах новой конструкции, исследование устойчивости профилей земляных плотин, исследование фильтрации в основаниях земляных сооружений при неоднородных грунтах на приборах ЭГДА и центрифуге.

В области гидравлики и гидродинамики Институт свое внимание сосредоточил на вопросах использования вакуума в плотиностроении, изучения явления эрозии речного русла (на примере Ореховостроя), изучения влияния донного льда, шуги и наносов на работу водозаборных сооружений (КаширГЭС) и др.

Большую работу Институт проводит в области гидромеханизации, занимаясь изучением размыва и намыва, транспорта пульпы, ре-

жима оборудования и т. д. Проверка теоретического и лабораторного материала осуществляется Институтом непосредственно на строительстве Азовсталь в Мариуполе.

В ближайшее время Институт примет участие в строительстве намывной плотины на одном из строительных участков.

В области изучения строящихся и выстроенных гидросооружений Институт, являясь пионером этого дела, провел и проводит большую работу.

Помещаемые ниже весьма оригинальные работы Ничипоровича А. А. являются только частью этого большого дела.

В настоящее время заканчивается исследование Гизельдонской ГЭС, Сталиногорских (б. Бобриковских), Волховской, Сызранской и Днепровской плотин, а также плотины типа Сенкова.

Институт приступает к исследованию строящейся плотины из каменной наброски в Карачунах (Донбасс).

Из проблем, которые в настоящее время останавливают внимание Института, следует отметить проблему проектирования плотин в сложных геологических условиях, а также проблему изучения на имевших место катастрофах плотин инженерных и геологических ошибок при проектировании и возведении последних.

Институт надеется, что перечисленные выше вопросы, стоящие в порядке дня его работы, столь близкие интересам гидротехники, найдут у гидротехнических организаций и специалистов-гидротехников надлежащий отклик.

Начальник сектора гидротехнических сооружений Института „Водгео“ инж. А. Г. Родштейн.

Проф. Г. И. Покровский и А. Я. Иоффе.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МАШИНЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

1. ЗНАЧЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

Еще Галилей, занимаясь вопросом о сопротивлении материалов, отметил, что прочность модели всегда больше прочности большого сооружения¹⁾. Это обстоятельство имеет особенное значение для земляных сооружений. Механические свойства грунтов настолько сложны и разнообразны, что до последнего времени невозможно было создать достаточно точную теорию перехода от лабораторных характеристик грунта к расчету больших сооружений, например земляных плотин. Поэтому также и изучение земляных сооружений на моделях было всегда мало продуктивным и не имело непосредственного практического значения.

Основная причина такого положения заключается в том, что все три главных фактора устойчивости массы грунта: вес грунта, угол внутреннего трения и силы сцепления различным образом зависят от размеров сооружения.

Поэтому для того, чтобы на модели получить те же соотношения сил, как и в действительности, необходимо прибегнуть к особым методам. Чтобы выяснить наиболее общий способ решения поставленной задачи, рассмотрим следующий пример. Пусть мы имеем вертикальный слой грунта толщиной, равной единице. Пусть в этом слое выделен вертикальный столб шириной dx (рис. 1) и высотой H .

Пусть нижней своей частью этот столб опирается на некоторую плоскость скольжения, составляющую угол α с горизонталью. Пусть γ — вес единицы объема грунта. Тогда условия равновесия можно формулировать следующим образом:

$$H\gamma dx \sin \alpha = H\gamma dx \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + K \frac{dx}{\cos \alpha}. \quad (1)$$

¹⁾ Galileo Galilei — Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due scienze attenti alla mecanica et i movimenti locali, 1638 г.

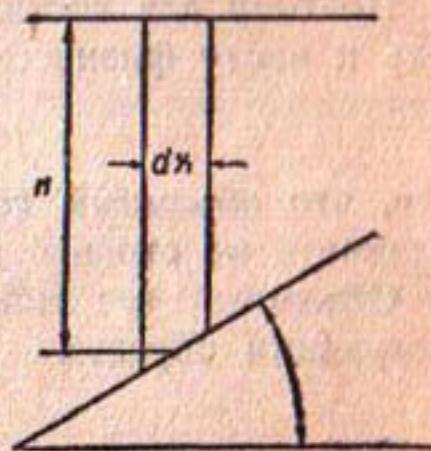


Рис. 1.

Здесь φ означает угол внутреннего трения взятого грунта и K — силу сцепления этого грунта, отнесенную к единице поверхности. Из формулы (1) находим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \alpha - \frac{K}{H\gamma \cos^2 \alpha}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что для получения тождественных результатов, при прочих равных условиях, необходимо, чтобы осуществлялось требование:

$$H\gamma = \text{const.} \quad (3)$$

Таким образом, переходя от действительного сооружения к модели, уменьшенной в n раз, мы получаем соотношение:

$$H\gamma = \frac{H}{n} \gamma_1, \quad (4)$$

где γ_1 означает необходимый объемный вес грунта у модели. Так как для построения модели необходимо сохранить неизменными другие свойства грунта, его сцепление K и угол внутреннего трения φ , а также и некоторые иные характеристики, то заменить грунт иным веществом на модели нельзя.

Поэтому для достижения необходимого значения γ_1 следует прибегнуть к чисто физическим методам. Из формулы (4) вытекает, что:

$$\gamma_1 = n\gamma, \quad (5)$$

т. е. что объемный вес необходимо для сохранения полного подобия увеличить во столько раз, во сколько модель меньше сооружения.

Объемный вес можно выразить через плотность ρ и ускорение g следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \rho g, \\ \gamma_1 &= \rho g_1. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

На основании формул (5) и (6) можно также написать:

$$g_1 = ng. \quad (7)$$

При обычных условиях большого сооружения g представляет собой ускорение силы тяжести. Поэтому для g_1 получаем следующее выражение:

$$g_1 = n \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2} \quad (8)$$

Рациональное применение моделей больших земляных сооружений для лабораторного исследования возможно, очевидно, только тогда, когда n достаточно велико и модель получается небольших размеров. По гру-

¹⁾ См. также аналогичный вывод в статье проф. Н. Н. Давиденкова — Новый метод применения моделей к изучению равновесия в грунтах, Журнал технической физики, том III, вып. I, 1933 г.

бому предварительному предположению величина n должна колебаться в пределах от 20 до 200.

Кроме того нужно подчеркнуть, что процессы, происходящие при деформациях грунтов, требуют известного времени. Поэтому совершенно необходимо, чтобы величина g_1 могла иметь одно и то же значение в течение известного, достаточного промежутка времени.

Всем изложенным требованиям можно удовлетворить простейшим способом, придавая g_1 нужное значение путем вращательного движения. Таким образом величина g_1 должна получиться как результат сложения ускорения силы тяжести с ускорением вращательного движения. Для того чтобы в течение одного оборота величина g_1 не изменялась, необходимо ось вращения расположить вертикально. Тогда для g_1 получается следующее соотношение:

$$g_1 = \sqrt{\omega^4 R^2 + g^2}. \quad (9)$$

Здесь ω означает угловую скорость вращения и R — расстояние от оси до данной точки модели.

Если g_1 очень велико по сравнению с g , то можно применить также следующую приближенную формулу:

$$g_1 = \omega^2 R. \quad (10)$$

Имея определенное значение R и n , можно согласно формулам (8) и (10) найти необходимое ω .

Получается:

$$\omega = \sqrt{\frac{9,81 \cdot n}{R}} \cdot \frac{1}{\text{сек}}. \quad (11)$$

Если $R = 1$ м и $n = 100$, получаем:

$$\omega = 31,4 \frac{1}{\text{сек}},$$

что соответствует 300 оборотам в минуту. Это весьма небольшое число и может быть осуществлено простейшими техническими средствами.

Из сказанного следует, что решением задачи моделирования является помещение модели сооружений из грунта на центробежную машину соответствующей конструкции ¹⁾. При достижении этой машиной вычисленного заранее числа оборотов в указанной модели получаются те же соотношения сил, какие должны действовать в большом сооружении.

Поэтому все разрушения и деформации модели должны вполне соответствовать тем явлениям, которые происходят в большом сооружении.

¹⁾ Идея и результаты применения центробежной силы к испытанию моделей простейших конструкций впервые были доложены инж. Philip B. Busky в секции прикладной механики Американской ассоциации инженеров-механиков на полугодижном собрании в июне — июле 1932 г. (не опубликовано).

2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ.

Согласно изложенному выше для целей моделирования земляных сооружений следует действие силы тяжести заменить действием центробежной силы. При полном тождестве физических свойств обеих сил в каждой данной точке геометрические соотношения поля силы тяжести и поля центробежной силы отнюдь не одинаковы. Так как по экономическим соображениям размеры центробежной машины не представляется возможным сделать достаточно большими по сравнению с размерами модели, приходится считаться с изменениями центробежной силы как по величине, так и по направлению в пределах модели.

Между тем размеры любого действительного сооружения так малы по сравнению с земным шаром, что поле силы тяжести можно всегда считать вполне однородным.

Чтобы выяснить наиболее рациональный способ устранения возникающих затруднений, необходимо рассмотреть основные свойства поля центробежной силы.

Прежде всего, эта сила f подчиняется уравнению:

$$f = m\omega^2 R, \quad (12)$$

где m — масса тела. Из этого уравнения следует, что силовые линии этого поля лежат в плоскостях, перпендикулярных оси вращения. В этих плоскостях силовые линии расходятся радиально от оси вращения. В плоскостях же, совпадающих с осью, эти линии параллельны.

Если в такое силовое поле поместить обыкновенную модель, построенную в прямоугольной системе координат, то действие центробежной силы не будет совпадать с действием силы тяжести.

Прежде всего объемный вес модели будет расти при переходе от центра вращения к периферии. Вследствие этого давление грунта на единицу поверхности будет определяться не соотношением:

$$H\gamma = P, \quad (13)$$

но величиной:

$$P_1 = \omega^2 \rho \int_{R_1}^{R_2} R dR = \frac{\omega^2}{2} \rho (R_2^2 - R_1^2). \quad (14)$$

Заменяя

$$R_2 = R_1 + H,$$

получаем:

$$P_1 = \omega^2 \rho R_1 H \left(1 + \frac{H}{2R_1} \right). \quad (15)$$

Но так как

$$\omega^2 \rho R_1 = \gamma_1,$$

то

$$P_1 = \gamma_1 H \left(1 + \frac{H}{2R_1} \right). \quad (16)$$

Величина $\pm \frac{H}{2R_1}$ указывает размер относительной ошибки в значении давления, получающейся при переходе от силы тяжести к центробежной силе. Так, если $R_1 = 1$ м, а размеры модели в направлении радиуса равны 0,2 м, то можно считать, что

$$H = \pm 0,1 \text{ м},$$

величина относительной ошибки ΔP составит:

$$\Delta P = \pm \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ или } 5\%.$$

Кроме указанной ошибки, мы будем иметь также и другую, происходящую от непараллельности центробежных силовых линий. Пусть расстояние от оси модели до ее боковой части, измеренное в направлении, перпендикулярном к R , равно x . Тогда путем простого геометрического построения можно показать, что отклонение центробежной силы от оси координат, параллельной оси модели, определится углом:

$$\Delta\alpha = \operatorname{arctg} \frac{x}{R}. \quad (17)$$

Другими словами:

$$\operatorname{tg}(\Delta\alpha) = \frac{x}{R}. \quad (18)$$

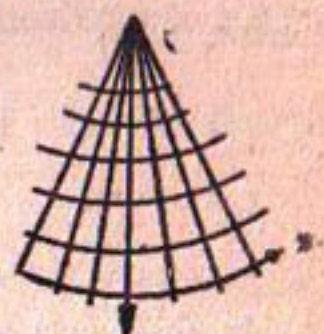


Рис. 2.

Если модель имеет размеры, сильно вытянутые в направлении, перпендикулярном к R , то получаются довольно значительные отступления от силового поля, соответствующего натуральному сооружению. В этом случае может быть выгодно построить модель в искаженной системе координат с таким расчетом, чтобы, увеличив ошибку по направлению R , уменьшить или совсем уничтожить ее по направлению x . Удобнее всего при этом воспользоваться цилиндрической системой координат, ось которых совпадала бы с осью вращения. Масштаб по направлению R можно в этом случае оставить неизменным. Тогда масштаб по направлению x будет расти прямо пропорционально R , и прямолинейные отрезки будут изображаться в виде дуг радиуса R (рис. 2).

В этом случае давление P_1 определится следующим образом:

$$P_1 = \omega^2 \rho \int_{R_1}^{R_2} \frac{R^2}{R_0} dR = \frac{\omega^2 \rho}{3R_0} (R_2^3 - R_1^3). \quad (19)$$

Здесь R_0 соответствует тому радиусу, при котором масштаб по оси x равен масштабу по оси R .

Допустив, что

$$R_1 = R_0$$

и обозначив

$$R_2 = R_1 + H,$$

получаем:

$$P_1 = \omega^2 \rho R_0 \left(H + \frac{H^2}{R_0} + \frac{H^3}{3R_0^2} \right). \quad (20)$$

Если

$$\omega^2 \rho R_0 = \gamma_1,$$

то

$$P_1 = H \gamma_1 \left(1 + \frac{H}{R_0} + \frac{H^2}{3R_0^2} \right). \quad (21)$$

В этом случае ошибка равна:

$$\Delta P = \pm \left(\frac{H}{R_0} + \frac{H^2}{3R_0^2} \right) \approx \pm \frac{H}{R_0}. \quad (22)$$

Ошибка же в величине угла наклона какой-либо линии будет в этом случае определяться соотношением:

$$\operatorname{tg}(\Delta \alpha) = \operatorname{tg} \alpha \frac{1 - \frac{R_0}{R}}{1 + \operatorname{tg} \alpha \frac{R_0}{R}}. \quad (23)$$

Из последнего соотношения видно, что если для всей модели отношение $\frac{R_0}{R}$ мало отлочно от единицы, ошибка в угле мало отлична от нуля при любых значениях α .

Таким образом в случае сильно распластанных профилей, к которым нужно отнести модели плотин, цилиндрическая система координат может оказаться особенно полезной. При этом, конечно, предполагается, что наибольшие размеры модели лежат в плоскости вращения. Это является наиболее удобным с технической точки зрения.

Наконец в случае моделей, сильно вытянутых по направлению радиуса, встречающихся, например, при исследовании давления грунта на подземные сооружения, можно применить систему прямолинейных координат, масштаб которых уменьшается обратно пропорционально R . В этом случае давление грунта по оси R будет воспроизводиться вполне точно, но вместе с тем влияние на ошибку в углах наклона любой линии сильно возрастет, ввиду чего эта система применима к моделям, имеющим малые размеры по оси x .

Можно было бы, конечно, главную ось модели располагать параллельно оси вращения. В указанном случае вдоль этой главной оси никаких искажений не происходило бы. Однако та степень точности, которая практически требуется пока от испытаний подобного рода, вполне допускает рассмотренные выше погрешности. В то же время совмещение наибольших размеров модели с плоскостью вращения значительно удешевляет и упрощает конструкцию центробежной машины.

Поэтому оказывается пока рациональным остановиться именно на таком типе машины.

Возможность искажений иного характера возникает вследствие того, что на всякое движущееся относительно вращающейся системы тело будет действовать кроме центробежной и гравитационной сил еще сила Кориолиса. Сила эта будет состоять вообще из двух компонент.

Одна из этих компонент f_T будет перпендикулярна к радиусу и оси вращения. Ее величина равна:

$$f_T = 2m\omega C_R,$$

где C_R есть проекция скорости движения данной материальной точки на направление радиуса. Вторая компонента будет совпадать с направлением радиуса. Она равна:

$$f_R = 2m \left(\omega + \frac{C_T}{2R} \right) C_T;$$

здесь C_T означает составляющую скорости, перпендикулярную к оси вращения и радиусу. Величина $\frac{C_T}{2R}$ может считаться при обычно встречающихся условиях малой по сравнению с ω . Поэтому приближенно:

$$f_R = 2m\omega C_T.$$

Складывая геометрически f_R и f_T и C_R и C_T и полагая, что (в векторных обозначениях):

$$f_R + f_T = f \quad \text{и} \quad C_R + C_T = C,$$

получаем:

$$f = 2m\omega C.$$

Как f , так и C лежат в плоскости, перпендикулярной к оси вращения. Можно C определить как проекцию скорости движения данной точки на указанную плоскость. Сила Кориолиса, перпендикулярная к направлению движения, будет вносить некоторое искажение. Для того чтобы учесть величину этого искажения, следует найти отношение силы f к центробежной силе. Получается:

$$\frac{2m\omega C}{m\omega^2 R} = \frac{C}{\pi n R}$$

(n — число оборотов).

Допустим, что $n = 5 \frac{1}{\text{сек}}$, $R = 100 \text{ см}$ и максимальная допустимая величина указанного отношения — 0,05. Тогда предельное значение

$$C = 78 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

Столь значительных или сколько-нибудь близких скоростей сползания откосов или иных деформаций при проведенных с киносъемкой

опытах ¹⁾ не встречалось. Таким образом сила Кориолиса не может при принятых условиях повлиять на результат экспериментирования. Это подтверждается также и следующими фактами. Если на модели имеются два противоположных откоса плотины или канала, то сила Кориолиса должна способствовать разрушению одного и препятствовать разрушению другого откоса. Поэтому можно было бы ожидать асимметричной картины обрушения. При всех подобных опытах, однако, асимметричность обрушенных профилей не выходила за пределы вероятной ошибки наблюдений ²⁾.

3. КОНСТРУКЦИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МАШИНЫ.

При конструировании центробежной машины для испытания моделей земляных сооружений основное внимание было направлено на простоту

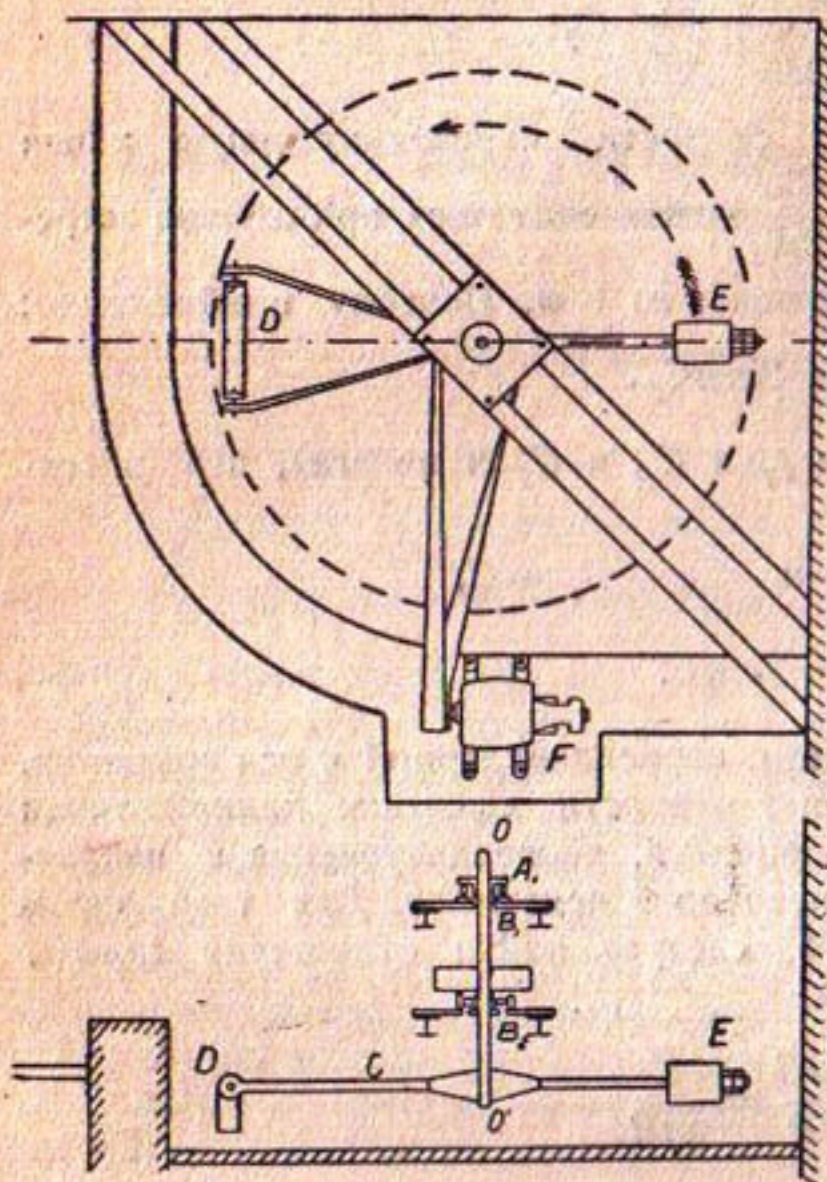


Рис. 3.

общей схемы и гибкость прибора в применении к различным частным случаям.

Вначале была построена небольшая машинка, приводившаяся в движение от руки ³⁾. После того как опыты с этой машинкой подтвердили правильность основных теоретических положений, была сконструирована инж. Л. И. Журавлевым и техником И. И. Куреньщиковым машина больших размеров, общий вид которой показан на рис. 3.

Вертикальная ось машины OO' опирается на шариковый подпятник A и направляется шариковыми подшипниками B_1 и B_2 . К нижнему свободному концу оси подвешено поперечное коромысло C . К одному из его концов, раздвоенному на-

¹⁾ А. Я. Иоффе и Г. И. Покровский — К вопросу о методике лабораторного определения угла устойчивого откоса грунта на центрифуге, Журнал технической физики, т. IV, вып. III, 1934 г. См. также вторую статью настоящего сборника.

²⁾ А. Я. Иоффе — Исследование зависимости угла устойчивого откоса песчано-глинистых смесей от их состава, Гидротехническое строительство, № 4, 1934 г.

³⁾ Л. И. Журавлев — Исследование устойчивости откосов на моделях земляных плотин при помощи центробежного прибора, Бюллетень Гидротехгеонинститута, № 10, 1932 г.

подобие вилки, подвешена на болтах каретка для модели *D* с боковыми стеклянными стенками. С противоположной стороны коромысла расположен соответствующий противовес *E*. Вращение машины осуществляется при помощи ременной передачи мотором *F* мощностью в 5 HP. Этот мотор сообщает машине около 240 оборотов в минуту.

Несомненно, что основное сопротивление вращению — аэродинамическое. Однако следует подчеркнуть, что придавать обтекаемую форму движущимся деталям машины в данном случае нет необходимости, потому что вся масса воздуха в котловане, где вращается машина, приходит также во вращательное движение.

При этом основное сопротивление получается за счет трения всей массы воздуха о стенки и дно котлована.

При работе с машиной необходимо обращать особое внимание на постепенное изменение числа оборотов как при разгоне машины, так и при ее остановке. Возникающие при этом инерционные силы самой машины и деформируемой модели могут в известной степени повлиять на устойчивость последней.

Так как каретка с моделью может свободно поворачиваться около

оси, перпендикулярной к радиусу и к оси вращения машины, она всегда устанавливается по направлению равнодействующей силы тяжести и центробежной силы. Когда скорость доходила до максимальной, каретка располагалась практически под прямым углом по отношению к своему первоначальному положению.

Число оборотов измерялось тахометром и поддерживалось при всех описываемых далее исследованиях одним и тем же, именно 200 оборотов в минуту. Принимая величину радиуса до средней части модели в 1,1 м, получаем увеличение силы тяжести при указанном выше числе оборотов приблизительно в 50 раз¹⁾.

¹⁾ Впоследствии масштаб моделирования был увеличен более, чем до 100.

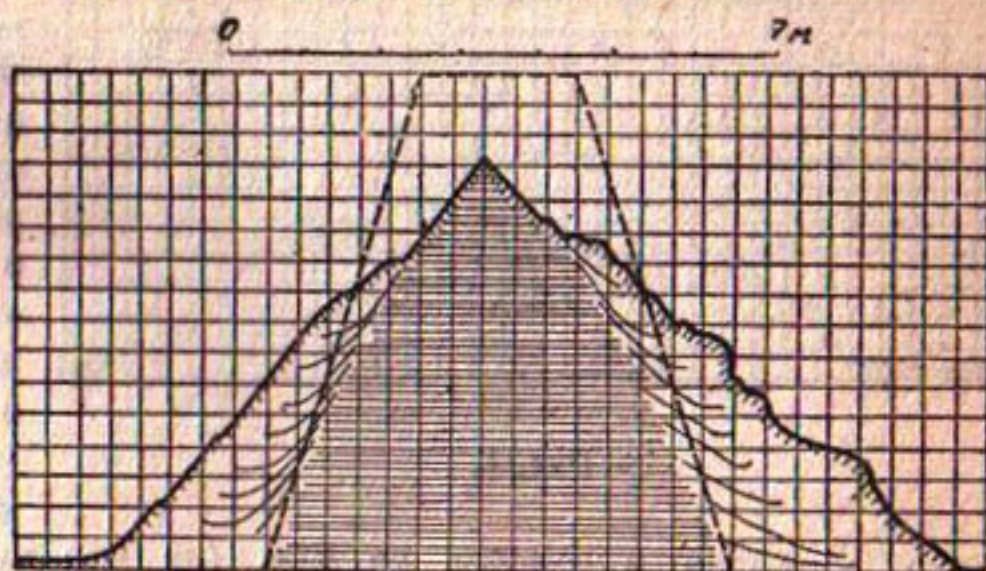


Рис. 4.

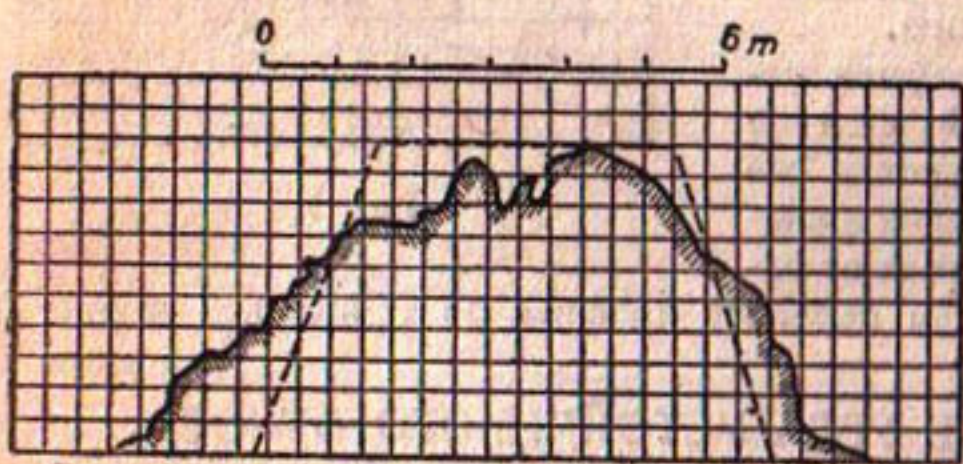


Рис. 5.

Таким образом, увеличение размеров модели получалось в соответствии со сказанным ранее в 50 раз. Так как общая максимальная высота модели составляет на описанной машине 0,2 м, то максимальная

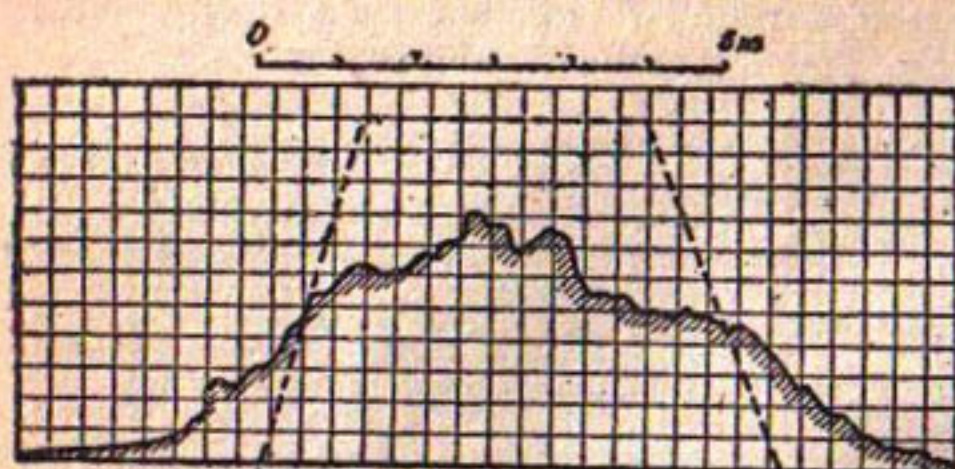


Рис. 6.

высота изображаемого сооружения могла, следовательно, доходить до 10 м. Эта величина, конечно, недостаточна для того, чтобы решать все вопросы возведения больших сооружений из грунта. Поэтому в дальнейшем предложено поставить к описанной центробежной машине более мощный мотор с целью довести

число оборотов в минуту до 600 (на что машина рассчитана). При таком числе оборотов эффективная высота испытываемого сооружения должна дойти до 90 м, что более чем достаточно для решения подавляющего большинства проблем земляного строительства.

Для первоначального испытания машины на ней были произведены разрушения нескольких моделей крутых насыпей. Общий характер разрушения виден на рис. 4 (модель из влажного песка) и рис. 5 и 6 (то же из глины разной влажности).

На всех рисунках вверху указан масштаб в метрах, соответствующий действительному сооружению.

Все указанные здесь профили изображены в прямоугольной системе координат. В действительности же они были построены в цилиндрической системе. Пример перехода от одной системы к другой путем переноса профиля по точкам дан на рис. 7.

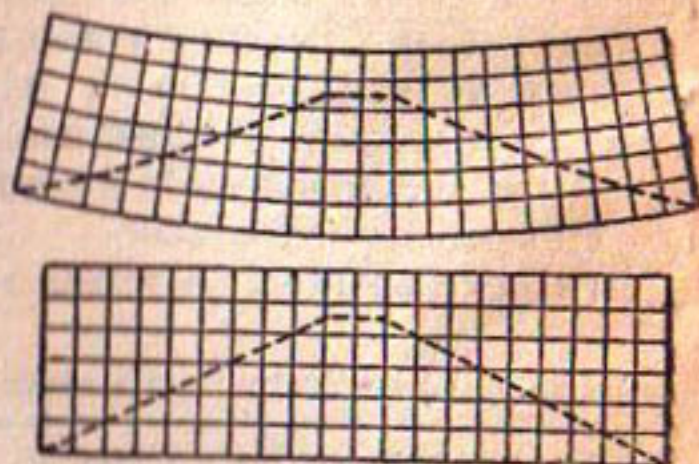


Рис. 7.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА УСТОЙЧИВОГО ОТКОСА.

Как известно, угол естественного откоса определяется величиной внутреннего трения в грунте. Однако это соответствует действительности лишь постольку, поскольку силы сцепления достаточно малы. В противном случае осуществить откос путем естественного обрушения грунта в малых размерах оказывается невозможным. Поэтому непосредственное лабораторное определение угла естественного откоса возможно только для совершенно сыпучих грунтов.

Между тем, учитывая трудности определения угла внутреннего трения грунтов, оказывается весьма существенным создать для любого грунта такие условия, при которых угол внутреннего трения и естествен-

ного откоса были бы достаточно близки друг к другу и было бы возможно измерение одного заменить измерением другого.

Такие условия создаются именно при помощи центробежной машины. Пусть оказывается необходимым определить тангенс угла внутреннего трения с точностью до 5%. Это значит, что определение вертикального катета обрушенного откоса грунта должно быть произведено также с точностью до 5%. Если общая высота откоса 0,2 м, то абсолютная величина допустимой ошибки составит 0,01 м.

Обращаемся теперь к формуле (2). Согласно поставленным выше условиям максимальная разница между тангенсом угла наклона плоскости скольжения α и тангенсом угла внутреннего трения φ не должна превышать 5% от последней величины. Ввиду сравнительно малого значения допустимой ошибки можно также написать:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} = \xi \leq 0,05.$$

Из формулы (2) следует:

$$\xi = \frac{K}{H\gamma \sin \alpha \cos \alpha}. \quad (24)$$

Отсюда вытекает, что максимальное значение сил сцепления, допустимых в грунте при заданной точности конечного результата, равняется:

$$K_{\max} = \xi H\gamma \sin \alpha \cos \alpha. \quad (25)$$

Принимая условия, изложенные выше, мы находим, что:

$$K_{\max} = 0,02\gamma \sin \alpha \cos \alpha \text{ [кг/см}^2\text{]}. \quad (26)$$

Полагая, что

$$\gamma = 2 \cdot 50 = 100; \alpha \approx 30^\circ \text{ и } \xi = 0,05,$$

получаем:

$$K_{\max} = 0,043 \text{ кг/см}^2.$$

Эта величина показывает, что углы естественного откоса можно определить при изложенных условиях достаточно точно только у мало-связных грунтов. К таким грунтам следует отнести средний и крупный песок любой влажности, суглинок и глину в водонасыщенном или под-водном состоянии¹⁾.

Несмотря на эти ограничения, центробежная машина даже в ее тепе-решнем состоянии в значительной степени расширяет возможности не-посредственного измерения углов естественного откоса.

Те углы откоса, которые получаются при испытании грунтов на цен-тробежной машине, хотя и не являются максимальными углами необру-шающегося откоса некоторого грунта, обладающего данными свойствами и находящегося в данных условиях, при высоте откоса, соответствующей масштабу моделирования, но их можно считать достаточно близкими к указанным углам. Поэтому им можно дать условное (более или менее

¹⁾ Проф. Г. И. Покровский — Капиллярные силы в грунтах, изд. Гидротех-геоинститута, вып. 15, 1933 г.

соответствующее действительности) название углов устойчивого откоса грунта. Так как в процессе проведения испытаний было установлено, что при уменьшении крутизны первоначально заданного откоса угол откоса, полученного после центрифугирования, возрастает, то вполне устойчивым считался откос, образовавшийся в результате обрушения вертикальной или наиболее близкой к ней насыпи.

Впрочем несомненно, что полученное таким путем значение угла несколько меньше истинной величины угла устойчивого откоса. Наиболее точные результаты можно было бы получить только в результате постепенного приближения (путем увеличения наклона необрушающегося откоса) к такому откосу, который, оставаясь устойчивым, был бы на границе обрушения.

После каждого испытания грунтовый откос залегал большей частью в виде беспорядочной массы, ограниченной некоторой поверхностью совершенно неправильной формы. Поэтому для перехода к соответ-

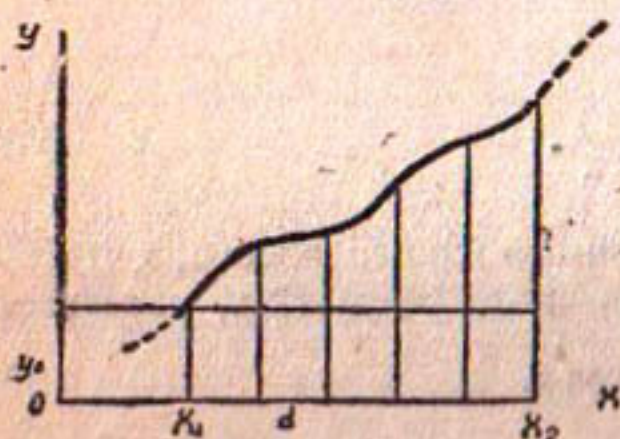


Рис. 8.

ствующему плоскому откосу и определения его угла необходимо было сглаживать кривую каждого откоса до прямой линии. В тех случаях, когда беспорядочная кривая проходила по более или менее определенному направлению, можно было без слишком большой погрешности заменять ее непосредственной прямой, приблизительно совпадающей с этим направлением. Во всех остальных случаях угол наклона сглаживающей прямой к горизонту, т. е.

средний угол данного откоса, определялся по специальной формуле, выведенной на основании следующих соображений.

Рассмотрим некоторый участок кривой, изображенный на рис. 8. Его средний угловой коэффициент, очевидно, равен отношению средней арифметической величины отрезков ординат точек участка кривой между этим участком и прямой, проведенной параллельно оси абсцисс через более близкую к ней конечную точку участка, к средней арифметической величине отрезков соответствующих абсцисс от точки x , ¹⁾.

Средний арифметический отрезок ординаты равен сумме отрезков ординат, которые проведены между точками x_1 и x_2 на расстоянии некоторого произвольного отрезка d друг от друга, деленной на их число, превышающее на единицу число отрезков длины d по оси абсцисс между теми же точками, т. е. средний арифметический отрезок ординаты выражается:

$$\frac{\sum_{x_1} (y - y_0)}{\frac{(x_2 - x_1)}{d} + 1},$$

¹⁾ x_1 — абсцисса конечной точки участка, более близкой к оси абсцисс.

где y_0 — меньшая из ординат конечных точек участка кривой. Средний же арифметический отрезок абсциссы равен простому выражению:

$$\frac{x_2 - x_1}{2}.$$

Деля первое выражение на второе:

$$\frac{2 \sum_{x_1}^{x_2} (y - y_0)}{(x_2 - x_1) \left(\frac{x_2 - x_1}{d} + 1 \right)},$$

получаем для среднего тангенса угла наклона общее выражение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2d \sum_{x_1}^{x_2} (y - y_0)}{(x_1 - x_2)^2 + d(x_2 - x_1)}. \quad (27)$$

Вычисленное по формуле (27) значение среднего углового коэффициента участка некоторой кривой тем ближе к истинному значению, чем меньше взят произвольный конечный отрезок d на оси абсцисс между ординатами. В тех случаях, когда данная кривая имеет вполне определенный плавный характер, выражаемый в аналитической форме, можно перейти от указанного отрезка к бесконечно малому приращению абсциссы, т. е. к дифференциалу независимого переменного dx . В результате этого перехода сумма указанных вначале отрезков ординат точек рассматриваемого участка кривой (который может вообще образовывать либо острый, либо тупой угол с положительным направлением оси абсцисс) представит собой, как нетрудно видеть, площадь, ограниченную участком кривой, прямой, проведенной параллельно оси абсцисс через более близкую к ней конечную точку участка, и ординатой другой конечной точки. Тогда, перенося приращение абсциссы в предыдущей формуле под знак суммы и заменяя его дифференциалом, получим общую формулу:

$$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2}{(x_1 - x_2)^2} \int_{x_1}^{x_2} (y \pm y_0) dx, \quad (28)$$

где знак, стоящий перед постоянной ординатой y_0 , должен быть противоположен знаку, получаемому в результате интегрирования основной функции y при отсутствии y_0 .

Преобразовывая интеграл в формуле:

$$\int_{x_1}^{x_2} (y \pm y_0) dx = \int_{x_1}^{x_2} y dx \pm \int_{x_1}^{x_2} y_0 dx = \int_{x_1}^{x_2} y dx \pm y_0 (x_2 - x_1),$$

находим, что интеграл, соответствующий расстоянию участка кривой (его ближайшей конечной точки) от оси абсцисс, выражает собой пло-

щадь прямоугольника, ограниченного прямой, параллельной оси абсцисс и проходящей через ближайшую конечную точку участка, ординатами обеих конечных точек и осью абсцисс. Подставляя значение интеграла в формулу (28), подводим ее к виду:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{(x_1 - x_2)^2} \int_{x_1}^{x_2} y dx \pm \frac{2y_0}{x_2 - x_1}, \quad (28')$$

где второй член представляет удвоенный тангенс угла наклона диагонали указанного прямоугольника. В практических случаях кривой откоса какого-либо земляного сооружения, средний угол наклона которой не зависит от ее направления (расположения относительно оси сооружения) и всегда является острым, соответствующий средний тангенс всегда является положительным, и второй член в формуле (28) или (28') должен быть взят со знаком минус. При этом всегда можно также расположить

исследуемую кривую откоса относительно осей координат таким образом, чтобы одна ее конечная точка у основания откоса совпадала с началом координат. Тогда $x_1 = 0$, $y_0 = 0$, и, обозначив абсциссу другой конечной точки x_2 просто через x , будем иметь:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{x^2} \int_0^x y dx^1). \quad (28'')$$

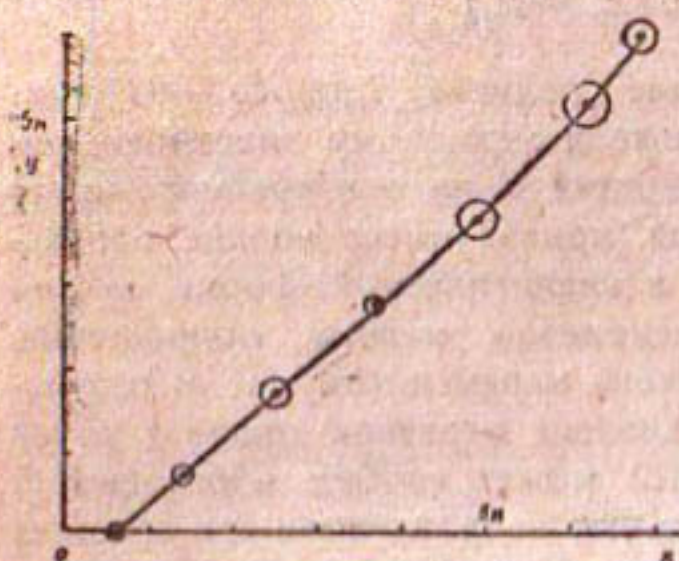


Рис. 9.

Для проверки возможности и условий применения центробежной машины к определению углов устойчивого откоса

грунтов были прежде всего проделаны многочисленные опыты по определению угла естественного или устойчивого откоса песка средней крупности как при влажности, соответствующей его максимальной связности, так и в подводном состоянии.

В результате статистической обработки 6 опытов с максимально связным песком получилась кривая откоса, изображенная на рис. 9. Радиусы отдельных кружков соответствуют при этом средним квадратичным ошибкам. Как видно из рис. 9, касательная к кривой откоса составляет 40° с горизонталью. Между тем, угол откоса того же песка в воздушно-сухом состоянии составляет около 38° . Таким образом можно считать, что углы внутреннего трения влажного и сухого песка равны, а полученную небольшую разницу объяснить силами сцепления в соответствии с изложенными выше теоретическими соображениями.

¹⁾ Усовершенствование этой формулы (написанной в виде общего результата приближенного численного интегрирования) см. в статье А. Я. Иоффе — Некоторые вопросы практического применения центробежного моделирования к испытаниям грунтов, Санитарная техника, № 4, 1934 г.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА УСТОЙЧИВОГО ОТКОСА СМЕСЕЙ ПЕСКА И ГЛИНЫ.

Метод испытания грунтов на центробежной машине дал возможность исследовать характер влияния состава грунта на угол его откоса. Необходимо оговориться, что непосредственное установление зависимости угла устойчивого откоса грунта от механического состава, т. е. величины частиц, не могло быть поставлено задачей исследований вследствие трудности получения достаточного количества фракций грунта в пределах от глины до песка и сравнительно меньшего практического интереса таких данных. Гораздо большее значение имеет угол откоса в зависимости от содержания песка и глины в смешанных грунтах, в том числе и искусственных смесях, причем понятие как песка, так и глины не дифференцируется. В соответствии с этим были произведены определения угла устойчивого откоса сначала для чистых песка и глины и затем для их смесей в определенном отношении. Глина при этом была взята из буровых скважин, заложенных на водоразделе между р. Усой и Волгой, содержала небольшое количество песчаных включений и отличалась значительной слабостью, особенно в разжиженном состоянии. Ее механический состав (определенный по первой схеме Робинзона) приводится ниже¹⁾:

Фракция в миллиметрах	Процентное содержание
10—2	—
2—0,5	следы
0,5—0,25	9
0,25—0,05	11
0,05—0,01	2
0,01—0,005	30
0,005—0,001	16
< 0,001	32

Песок состоял из сильно ожелезненных кварцевых зерен средней крупности.

Для выявления характера зависимости угла устойчивого откоса от состава смеси был произведен, таким образом, ряд опытов со смесями, содержащими мокрый песок и глину в отношениях 0:1, 1:3, 1:1, 3:1 и 1:0. Так как объемные веса мокрого песка и глины можно было считать в данном случае одинаковыми, то указанные отношения справедливы как для объемов масс грунта, так и для весов. Влажность смешанного грунта колебалась около 30—35%, причем определения производились в подводном или полуподводном состоянии (аналогично условиям земляных плотин). После центрифугирования в течение приблизительно 10 минут и обрушения грунтовой насыпи получались откосы в направлении вращения и в обратном направлении.

¹⁾ При оценке полученных данных необходимо иметь в виду, что данная глина была карбонатизирована.

Для определения угла устойчивого откоса оказалось возможным воспользоваться средними значениями из ряда испытаний грунта данного состава, причем каждое испытание давало два таких угла.

Число испытаний, которым подвергался грунт каждого состава, зависело от сходимости получаемых результатов. Наибольшие колебания отдельных значений угла имели место при резком изменении в ходе функции его от состава смеси. Исследование влияния этого состава производилось в форме исследования зависимости между углом устойчивого откоса грунта и содержанием песка в смеси и дало следующие результаты:

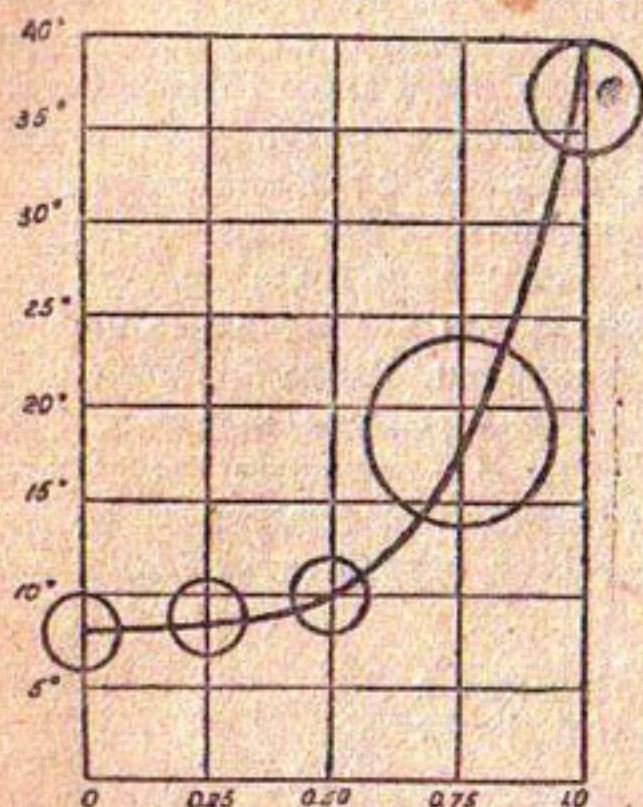


Рис. 10.

Доля содержания песка в смеси	Угол устойчивого откоса грунта	Среднее квадратичное отклонение (округленно) в градусах
0	8°	2
0,25	8° 40'	2
0,5	10°	2
0,75	18° 40'	5
1,0	37°	3

Полученным экспериментально результатам можно дать следующее теоретическое истолкование.

Как видно из рис. 10, где дана графически зависимость между относительным содержанием песка в смеси q и углом откоса α , график весьма близок к параболе четвертой степени с начальной ординатой, соответствующей углу откоса чистой глины, и распадается вообще на две части. Первая часть соответствует малому количеству песка, когда зерна его отделены друг от друга прослойками глины и соприкасаются весьма редко. В этой области происходит практически только трение глины о глину, и поэтому значение α остается почти постоянным. Но как только относительное объемное содержание глины в песке становится равным или меньше пористости песка, зерна последнего приходят во взаимное соприкосновение, и величина α начинает быстро расти. В самом первом приближении для зависимости α от q можно было бы дать здесь следующую формулу:

$$\alpha = (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{q - \varepsilon}{1 - \varepsilon} + \alpha_1^1). \quad (29)$$

Здесь α_1 означает угол устойчивого откоса глины, α_2 — угол устойчивого откоса песка (в градусах) и ε — пористость песка.

¹⁾ Для интервала $\varepsilon \leq q \leq 1$.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НА ДЕФОРМИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ.

При возведении различных сооружений из грунта на слабом основании весьма часто геометрические соотношения, определяющие форму этих сооружений, диктуются не свойствами грунта, из которого состоит данное сооружение, но свойствами основания. Общеизвестны случаи катастрофических деформаций сооружений, которые сами по себе не могли вызывать сомнений в своей прочности и разрушались только вследствие слабости оснований. Существует довольно много различных исследований подобных явлений. Несомненно, что точный и строгий расчет должен был бы привести здесь к весьма сложным формулам потому, что самые физико-механические свойства грунтов сложны и многообразны. Исследуя же устойчивость какого-либо основания, необходимо кроме свойств грунтов в каждой данной точке учитывать также и особенности геологического строения и чередование напластований, различных по своим свойствам. Все это делает детальное решение поставленной задачи сложным и, может быть, даже невыполнимым при нашем теперешнем знании грунта. Таким образом понятно, почему уяснение и точная формулировка всякого положения об устойчивости земляного сооружения на слабом основании имеют теоретическое и практическое значение, хотя бы это положение освещало лишь какую-либо одну сторону вопроса, подлежащего исследованию.

Вопрос об устойчивости земляных сооружений на слабых основаниях является по существу вопросом о зависимости угла, максимально допустимого, т. е. устойчивого откоса грунта тела сооружения от характера и свойств основания. До сего времени углы естественного или устойчивого откоса считались постоянной характеристикой грунта, независимо от того основания, на котором стоит данный откос. В действительности, однако, такой угол характерен для грунта лишь в случае недеформируемого, скального основания. В противном случае угол откоса понижается вместе с уменьшением прочности основания. Возведение сооружений на слабых основаниях, естественно, связано также с их осадкой, т. е. с частичным погружением тела сооружения в основание. Задачей данного исследования и является прежде всего изложение одной теоремы, определяющей устойчивость откоса (в отношении сползания) на слабом основании любого геологического строения. Главное достоинство излагаемой здесь теоремы представляет чрезвычайная простота конечного вывода, наглядно иллюстрирующая существующие в данном случае физические соотношения.

Пусть у нас имеется откос плотины или насыпи, покоящейся на основании, состоящем из ряда пластов, как это схематически показано на рис. 11. Выделим из насыпи и основания два расположенных рядом столба грунта шириной (в плоскости чертежа) dx и с толщиной (в направлении, перпендикулярном к плоскости чертежа), равной единице. Тогда разница в весе этих столбов будет равна:

$$\gamma_1 dy dx,$$

где γ_1 — объемный вес грунта, из которого состоит откос. Обозначим h_1 высоту слоя грунта с однородными свойствами, отсчитанную по линии раздела между рассматриваемыми столбами. Нетрудно доказать, что общая сила бокового давления более высокого столба на более низкий должна быть равна:

$$\gamma_1 dy \sum_1^n h_i \zeta_i,$$

где $\sum h_i \zeta_i$ захватывает все слои грунта, по тем или иным причинам подлежащие рассмотрению. Коэффициент ζ_i представляет собою число, указывающее, какую часть вертикального давления составляет боковое. Очевидно, что всегда:

$$\zeta_i \leq 1. \quad (30)$$

Для устойчивости системы необходимо, чтобы указанная выше сила бокового давления компенсировалась трением в грунте. Сила трения при этом будет равна:

$$k_n dx \sum_1^n h_i \gamma_i.$$

Здесь k_n означает коэффициент внутреннего трения в слое грунта с номером n , и сумма простирается на все вышележащие грунты. При этом γ_i есть объемный вес в соответствующем слое грунта. На основании сказанного можно написать следующее условие устойчивости системы:

$$\gamma_1 dy \sum_1^n h_i \zeta_i \leq k_n dx \sum_1^n h_i \gamma_i \quad (31)$$

или

$$\frac{dy}{dx} \leq \frac{k_n \sum_1^n h_i \gamma_i}{\gamma_1 \sum_1^n h_i \zeta_i}. \quad (32)$$

На основании рис. 11 можно также написать:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (33)$$

Кроме того можно допустить, что величина γ_1 достаточно постоянна для всех слоев грунта. Не изменит соотношений также допущение, что $\zeta = 1$.

При таких условиях получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq k_n, \quad (34)$$

но k_n можно рассматривать как тангенс угла устойчивого откоса для слоя с номером n , т. е.:

$$k_n = \operatorname{tg} \alpha_n. \quad (35)$$

Из этого следует:

$$\alpha \leq \alpha_n.$$

Это означает, что всякий откос будет безусловно устойчив, если угол его наклона к горизонту не превосходит угла устойчивого откоса любого из грунтов, составляющих основание¹⁾. Это положение именно благодаря своей простоте особенно хорошо вскрывает свойства поставленной проблемы и является ценным вследствие чрезвычайной сложности исследуемого вопроса в целом.

Несомненно, что неравенство в соотношении (35) будет тем более значительным, чем больше силы сцепления в данном грунте.

Лабораторные исследования в области слабых оснований на центробежной машине имели целью проверку изложенной теории, т. е. проверку равенства углов откоса грунта основания и стоящей на нем модели сооружения. Для этого дно каретки машины заполнялось более или менее разжиженной массой грунта, состоящей из смеси глины с некоторым количеством песка и образующей эквипотенциальную (цилиндрическую) поверхность по отношению к центробежной силе, соответствующую горизонтальной поверхности основания натурального сооружения. Угол устойчивого откоса материала основания определялся предварительным испытанием (на недеформируемом основании, т. е. непосредственно на железном дне каретки). Модель сооружения, стоящего на таком слабом основании, строилась из водонасыщенного песка, угол устойчивого откоса которого (также на недеформируемом основании) колебался в пределах около 40° , и представляла собой довольно тонкую вертикальную стенку. После центрифугирования модель претерпевала значительную осадку во внутрь слабого основания. Для каждого типа основания была проведена серия опытов, количество которых, как обычно, зависело от величины статистических колебаний угла откоса в отдельных случаях. Все результаты испытаний, содержащие углы откоса грунта основания и тела модели земляного сооружения и средние квадратичные отклонения угла откоса песка модели на слабом основании, помещены ниже:

Угол откоса грунта основания	Угол откоса тела модели	Среднее квадратичное отклонение
4°	$10^\circ 15'$	$2^\circ 16'$
11°	$18^\circ 30'$	$2^\circ 54'$
15°	$22^\circ 13'$	$1^\circ 21'$
18°	$25^\circ 53'$	$1^\circ 40'$
38°	41°	$2^\circ 20'$

В последнем испытании основанием модели являлся водонасыщенный песок, т. е. тело и основание были однородны.

¹⁾ Влияние слабого (неустойчивого) геологического пласта на устойчивость откоса убывает, естественно, с глубиной этого пласта. Характер и степень указанного убывания и установление той границы глубины, за которой влияние какого-либо слабого основания практически исчезает,—подлежат особому исследованию (см. третью статью настоящего сборника).

Данные таблицы показывают, что угол откоса модели на слабом основании во всех случаях превышает угол откоса этого основания, причем разность между углами (за исключением последнего особого случая) сохраняет почти постоянное значение. Поэтому кривая зависимости может быть представлена в виде прямой, наклонной под углом 45° к оси абсцисс и имеющей начальную ординату, равную средней указанной разности. Такая линейная зависимость изображена на рис. 12, на котором по оси абсцисс отложены углы откоса основания α_2 и по оси ординат — соответствующие углы откоса модели α_1 . Наличие начальной ординаты обуславливает отклонение результатов моделирования от тех соотношений, которые должны по вышеизложенной теории иметь место в натуральных сооружениях¹⁾. Однако кажущееся несовпадение теории и эксперимента находит себе простое и естественное объяснение прежде всего в условиях самого моделирования, при которых слабое основание залегает весьма тонким слоем на жестком дне каретки, со-

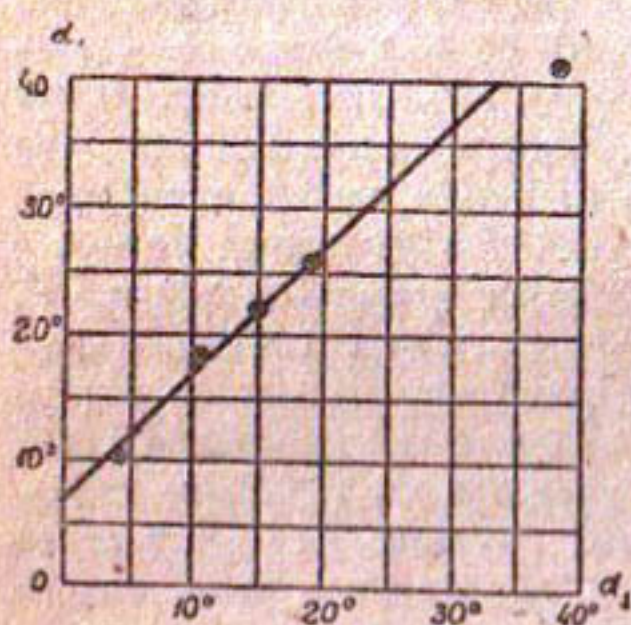


Рис. 12.

ответствующем скале. В этих условиях осадка модели на слабом основании приводит к тому, что на всей глубине до дна погружающийся в основание материал тела модели перемешивается с материалом самого основания, отчасти выпирая его, и продолжаясь возвышаться над уровнем основания модель находится при центрифугировании фактически не на первоначальном слабом основании, а на некоторой смеси грунта тела и основания, более устойчивой, нежели само по себе основание. Так как в течение центрифугирования происходят одновременно процессы осадки и сползания откосов модели, из которых первый (в результате перемешивания материалов тела и основания) повышает угол устойчивого откоса основания (как свойство составляющего его грунта), а второй понижает угол откоса грунта, расположенного на деформируемом основании (как угол фактического откоса, образуемого в действительности моделью на этом основании), — то можно считать, что сползание откосов прекращается в тот момент, когда угол откоса модели становится равным углу откоса основания. Указанное соображение непосредственно вытекает и обобщает теорию откосов на слабых основаниях. В условиях натурального сооружения, однако, оно не всегда имеет значение, так как материал тела сооружения, погружающийся в результате осадки в основание, далеко не всегда доходит до скалы, между тем как по указанной теории угол откоса данного земляного сооружения определяется не обязательно углом откоса верхнего слоя основания, непосредственно соприкасающегося с сооружением, но

¹⁾ Исходя из формулы (35) со знаком равенства. Следует помнить, что область значений α , для которых справедливо $\alpha > \alpha_n$, теоретически здесь вообще не рассматривается.

наименьшим из углов откоса всех нижележащих слоев. Таким образом изложенная теория сохраняет свою справедливость в первоначальной форме для всех практических случаев проектирования и возведения земляных сооружений на слабых основаниях. Кроме того некоторое расхождение теории и опыта обусловливается наличием сил сцепления.

Степень проникновения материала тела внутрь основания, т. е. количество проникающего материала, зависит от степени устойчивости этого основания. Чем более слабым является основание, т. е. чем меньше угол его устойчивого откоса, тем большее количество грунта тела проникает в основание, и тем большее влияние оказывает это проникновение на угол откоса модели на слабом основании. Поэтому при повышении угла откоса основания относительное влияние проникновения и перемешивания материалов тела и основания становится все менее ощутительным. В таблице на стр. 23 в первом случае угол откоса тела превышает угол откоса основания в 2,56 раза, в четвертом случае лишь в 1,44 раза. При этом абсолютная разность между обоими углами остается, как было указано, постоянной и представляет величину начальной ординаты прямой, выражающей зависимость угла откоса песка модели от угла откоса его первоначального основания, т. е. $\alpha_1 = f(\alpha_2)$.

Испытание песка на одинаковом основании, как и следовало ожидать, дало угол откоса, почти совпадающий с углом его устойчивого откоса. Сравнительно небольшое превышение последнего угла в этом случае (41° и 38°), может быть, до известной степени объяснено частичным переходом воды под действием центробежных сил из тела модели в основание и возникновением сил сцепления, повышающих угол устойчивого откоса по сравнению с условиями жесткого непроницаемого основания, не допускающего выхода воды и образования свободных водных поверхностей в грунте испытываемой модели.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ЗАПРОЕКТИРОВАННОГО ДЕРИВАЦИОННОГО КАНАЛА ВОЛЖСКОЙ ГЭС У САМАРСКОЙ ЛУКИ.

В декабре 1932 г. проектный отдел Бюро Большой Волги обратился в Гидротехгеоинститут с предложением дать заключение о допустимых откосах водораздельной части деривационного канала (между р. Усой и Волгой) Волгостроя у Самарской луки. Канал в этой части должен иметь длину 2,5 км, ширину по дну 40 м и по верху около 500 м (с устройством берм) и проходить частью целиком в глине, частью в глине и известняках на некоторой высоте от дна. Глубина канала должна по схематическому проекту составлять 20 м, а подводной части 10 м. При этих условиях необходимо было подвергнуть исследованию лишь вызывающие сомнения откосы из глины. Сами исследования должны были быть произведены в исключительно краткий срок.

Экспериментируемый грунт по трассе проектируемого канала представлял собой при этом весьма плотную синюю глину с большим ко-

личеством мелких кристаллов пирита и твердыми мергелистыми включениями. Исследования заключались в центрифугировании моделей канала аналогично моделям земляных плотин, в испытании устойчивости и определении угла откоса. Первоначальные опыты были поставлены отдельно с подводной частью канала. Для этого было построено несколько поперечных профилей канала с откосами под углом около 60° (рис. 13). Сечение канала заливалось водой.

При высоте ~ 12 см указанные откосы соответствовали при данном масштабе моделирования 49,56 откосам высотой около 5,95 м и по-

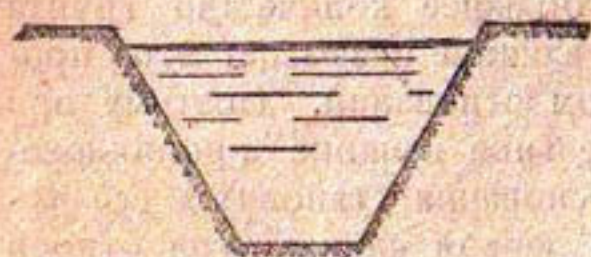


Рис. 13.

сле 10-минутного вращения сползли до угла в среднем около 50° , обнаружив, таким образом, значительную устойчивость. После этого перешли к опытам с почти вертикальными ($\sim 85^\circ$) откосами, причем, поскольку размеры каретки не позволяли воспроизвести натуральную высоту откоса в 20 м, действие отпавшей верхней части модели на нижнюю было заменено искус-

ственной нагрузкой. Так, были построены профили высотой ~ 16 см, нагруженные тремя рядами латунных цилиндров диаметром в 3 см и высотой в 7,5 см или в переводе на сплошную нагрузку $7,5 \cdot \frac{\pi}{4} \approx 5,9$ см.

Свободное пространство между откосами точно так же заливалось водой. Высота откоса канала, соответствующая грунтовой (подводной) части модели, составляла $\sim 7,9$ м. При удельном весе латуни 8,5 и глины 2 и данном соотношении соответствующих высот на модели центробежное давление на единицу поверхности возрастало приблизительно в 2,56 раза, и имитируемая общая высота канала достигала $7,9 \cdot 2,56 \approx \sim 20,3$ м, из которых около 8 м под водою. При данных условиях моделирования вода находилась в статическом состоянии, поэтому динамические воздействия текущей воды в канале на грунт, явления размыва и эрозии не могли быть учтены и изучены. Это обстоятельство, несмотря на большую скорость течения (до 5 м/сек), не имеет, впрочем, большого значения постольку, поскольку весь канал предполагается забетонировать (вследствие значительной трещиноватости известняков, слагающих на некоторых участках его дно и нижние части берегов).

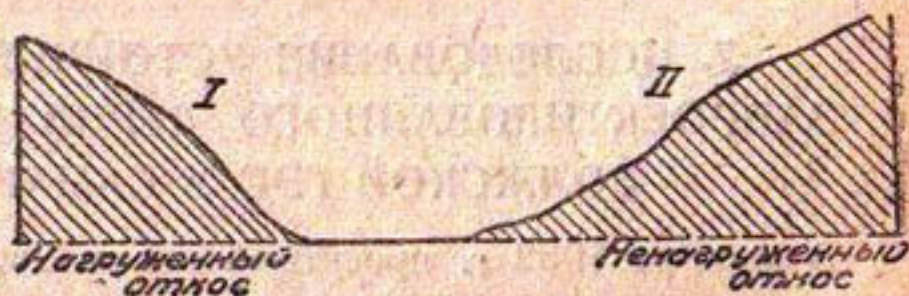


Рис. 14.

При проведении опытов один грунтовой откос указанной высоты оставался ненагруженным, а другой был нагружен у края, как изложено выше. Центрифугирование производилось сначала в течение 10 минут и затем 2 часов. В результате разрушения вертикальных откосов канала получились профили, изображенные соответственно на рис. 14 и 15 (в прямоугольной системе координат).

Под действием центробежной силы они осели примерно на 5 см. Из сравнения всех четырех откосов следует, что их различия между собой не на много выходят за пределы их собственных неровностей и не подчиняются определенной закономерности. Другими словами, длительность действия силы, вызывающей сползание откосов, в пределах до 2 часов и сама сила, соответствующая высоте в пределах от 8 до 20 м, не оказывают влияния на угол откоса данного грунта. Поэтому для определения угла опустимого откоса оказалось возможным взять величину среднего между ними угла.

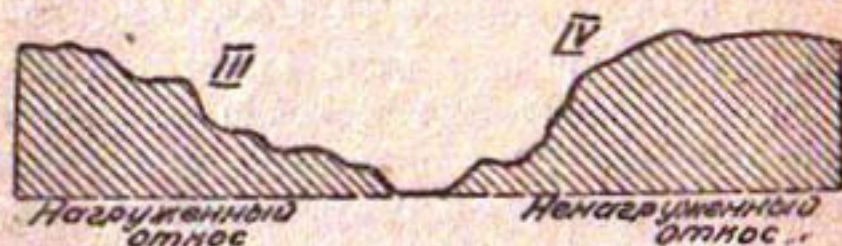


Рис. 15.

Так как наибольшее практическое значение имеет угол откоса дна канала, обусловленный обрушившимися массами грунта, то помимо угла каждого откоса находился также тангенс угла наклона к горизонту касательной к кривой этого откоса в точке пересечения с дном. Средний указанный тангенс составлял 0,522 и $\alpha_{cp} = \arctg 0,522 = 27^\circ 36'$. Минимальный же тангенс составлял 0,325 и угол $\alpha_{min} = 18^\circ 1'$. Среднее квадратичное отклонение тангенса равнялось $\approx 0,138$ и соответствовало отклонению угла $5^\circ 50'$. Исходя из среднего угла откоса глины у основания, получаем возможным двойное заложение ($\lg \alpha = 1:2 = 0,5$) смоченной части откосов канала в глине (без запаса прочности). Все результаты исследований откосов, относящиеся к рис. 14 и 15, представляемы ниже.

	Тангенс угла всего откоса	Угол всего отко- са	Тангенс угла откоса у основания	Угол откоса у осно- вания
I	0,8381	$39^\circ 58'$	0,325	$18^\circ 01'$
II	0,5127	$27^\circ 02'$	0,335	$18^\circ 32'$
III	0,4656	$24^\circ 58'$	0,915	$42^\circ 29'$
VI	0,6618	$33^\circ 30'$	0,512	$27^\circ 04'$
Среднее арифметическое значение	0,61955	$31^\circ 48'$	0,522	$27^\circ 36'$
Среднее квадратичное от- клонение	0,083997	$3^\circ 20'$	0,138	$5^\circ 50'$

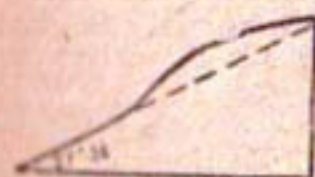


Рис. 16.

Средняя сглаженная кривая откоса изображена на рис. 16. Среднее значение угла откоса, полученное описанным путем, весьма близко к величине, принятой предварительно при проектировании. Таким образом мы имеем здесь простейший пример применения центробежной машины к решению конкретной практической задачи.

При испытании глины в разжиженном состоянии (Tonwassermenge) она не обнаружила никакой устойчивости и расплзлась по каретке

машины подобно жидкости, образовав эквипотенциальную, т. е. искривленную по окружности вращения, поверхность (горизонтальную плоскую поверхность в прямоугольной системе).

8. О МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЛЬТРАЦИИ.

Во всех описанных случаях, правильно воспроизводя соотношения сил, мы все же не можем достигнуть полного подобия модели и большего сооружения. Это особенно важно отметить в отношении фильтрации. Центробежная сила правильно воспроизводит разности давлений, но не увеличивает длины фильтрационного пути. Таким образом градиенты возрастают во столько раз, во сколько модель меньше сооружения. Вследствие этого и скорости фильтрации соответственно увеличиваются. Одновременно, однако, возрастают также силы, прижимающие частицы грунта друг к другу. Допуская, что силы сцепления при этом играют малую роль, можно сделать следующий вывод: размыв грунта фильтрующей водой начнется на модели и в действительности при соблюдении подобия. Значительная интенсивность фильтрации помогает скорейшему достижению окончательного состояния модели, так как ускоряет выжимание воды из пор грунта и стабилизацию его деформаций, позволяя в течение нескольких часов получить результат, который в действительности потребовал бы времени в несколько месяцев.

9. О МОДЕЛИРОВАНИИ КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ.

В заключение следует указать на то, что действие центробежной силы, увеличивая кажущийся объемный вес воды, соответственно должно уменьшать высоту капиллярного поднятия. Таким образом оказывается возможным, поддерживая на определенной высоте уровень грунтовых вод модели, получить выше этого уровня правильно моделированное распределение влажности. Так как от влажности зависит ряд свойств грунта, например сцепление, то все эти свойства должны быть также правильно воспроизведены. Это позволяет решать описанным здесь путем довольно сложные задачи, математическая формулировка которых пока еще совершенно невозможна.

Проф. Г. И. Покровский.

ПРИМЕНЕНИЕ КИНОСЪЕМКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДЕФОРМАЦИЙ МОДЕЛЕЙ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ЦЕНТРИФУГЕ.

Описанная в предшествующей статье настоящего сборника центробежная машина для испытания моделей земляных сооружений имеет существенное неудобство. Она дает возможность точно фиксировать деформации и разрушения модели только после остановки машины путем непосредственного замера. Но при таком способе исследования оказывается совершенно невозможным судить о динамике явления. В частности, нельзя установить, при какой именно скорости вращения наступило то или иное разрушение.

Для того чтобы избежать этого существенного недостатка и получить вместе с тем объективную регистрацию достаточного числа промежуточных состояний деформации, к описанной выше машине была добавлена установка с киноаппаратом, приспособленным для замедленной съемки. Перспективный схематический вид всей установки показан на рис. 1. Здесь на верхнем конце вертикальной оси центрифуги видна горизонтальная ферма. К одному концу этой фермы прикреплен киносъемочный аппарат легкого типа и к другому — соответствующий противовес. В середине фермы помещен небольшой электромотор, питаемый

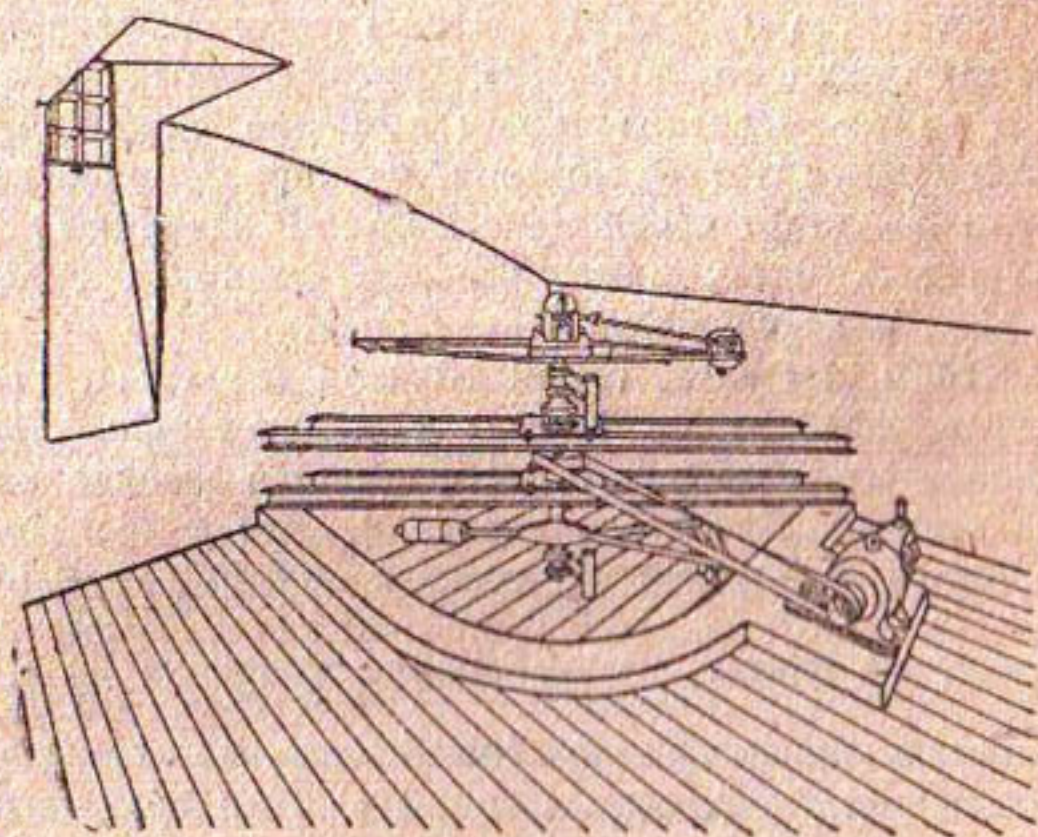


Рис. 1.

током через коллектор на оси машины. Этот электромотор приводит в движение при помощи карданного вала киноаппарат. При этом получаются снимки, следующие друг за другом через промежутки времени, примерно, в 1,5 секунды. Меняя скорость вращения мотора реостатом, можно, конечно, изменять этот промежуток в довольно значительных пределах.

Освещение модели, необходимое для съемок, осуществляется при помощи электроламп, укрепленных на каретке, в которой помещена модель. Боковые стенки каретки сделаны из зеркального стекла. При этом стекло, находящееся на той же стороне, где помещены лампы, заматировано. Таким образом модель откоса, насыпи или выемки в грунте изображаются на киноплёнке в виде темного силуэта на ярко освещенном фоне.

Необходимо отметить, что в начале экспериментирования приходилось бороться с затруднениями, вызванными действием значительной центробежной силы на вращающийся киносъемочный аппарат. В частности, вследствие этого пришлось ограничиться сравнительно незначительной скоростью вращения, именно около 200 оборотов в минуту. Это соответствовало увеличению объемных сил в модели примерно в 50 раз по сравнению с силой тяжести.

Как видно из рис. 1, машина приводится в движение при помощи мотора (мощность в 5 HP), причем передача осуществляется ремнем. Этот ремень надет на шкивы довольно свободно. Вследствие этого при пуске происходит буксование, и скорость машины только весьма постепенно достигает своей максимальной величины. Это позволяет удобно проследить связь между увеличивающимися силами, действующими на модель, и деформациями последней.

Чтобы выяснить, каким образом возрастает скорость вращения, необходимо, конечно, прибегнуть к наблюдениям. Однако эти наблюдения удобнее всего проводить, если известен заранее ожидаемый теоретический ход явления. Для этого допустим, что к вращающейся части машины приложен некоторый постоянный крутящий момент. Этот момент расхо-

дится, во-первых, на ускорение вращения $\frac{d\omega}{dt}$ и, во-вторых, на преодоление аэродинамического сопротивления. Ввиду того что машина вращается на шарикоподшипниках, непосредственным трением можно пренебречь. Можно принять, что аэродинамическое сопротивление пропорционально квадрату угловой скорости ω . Вследствие всего сказанного можно написать:

$$\frac{d\omega}{dt} = a - b\omega^2. \quad (1)$$

Здесь t означает время, a и b — некоторые постоянные, при этом:

$$a = \frac{M}{I}, \quad (2)$$

где M — крутящий момент и I — момент инерции машины. Величина же b равна аэродинамическому сопротивлению при $\omega = 1$.

Интегрируя уравнение (1), получаем:

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{b} \cdot \frac{1 + Ce^{-2\sqrt{ab} \cdot t}}{1 - Ce^{-2\sqrt{ab} \cdot t}}}. \quad (3)$$

Здесь C является постоянной интегрирования. Полагая, что при $t = 0$ и $\omega = 0$, находим:

$$C = -1.$$

Таким образом получается:

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{b} \cdot \frac{1 - e^{-2\sqrt{ab} \cdot t}}{1 + e^{-2\sqrt{ab} \cdot t}}}. \quad (4)$$

Зная ω , можно найти отношение центробежной силы к силе тяжести. Оно равно:

$$n_1 = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad (5)$$

где R — радиус центрифуги и g — ускорение силы тяжести.

На модель, помещенную в каретке центрифуги, действуют одновременно как центробежная сила, так и сила тяжести. Результирующая обеих этих сил превосходит силу тяжести в

$$n = \sqrt{\frac{\omega^4 R^2}{g^2} + 1} \quad (6)$$

раз.

Пользуясь формулами (6) и (4), находим:

$$n = \sqrt{\frac{a^2 R^2}{b^2 g^2} \left[\frac{1 - e^{-2\sqrt{ab} \cdot t}}{1 + e^{-2\sqrt{ab} \cdot t}} \right]^4 + 1}. \quad (7)$$

Чтобы воспользоваться формулой (7), необходимо найти величины a и b . Это сделать проще всего следующим образом. При малых значениях t , когда скорость вращения еще незначительна, каретка с моделью отклонена на сравнительно малый угол от своего положения при неподвижной машине. Благодаря этому высота изображения каретки на киноплёнке будет соответственно уменьшена по сравнению с тем случаем, когда боковая сторона каретки параллельна плёнке. Пусть A_0 — полная высота изображения каретки и A_1 — высота изображения в данный момент t_1 . На основании простых геометрических соображений можно написать (при достаточном расстоянии от киноаппарата до каретки) следующее:

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2}}. \quad (8)$$

Допуская, что t_1 достаточно мало, можно формулу(1) упростить. В результате этого получается:

$$\omega_1 = at_1; \quad a = \frac{\omega_1}{t_1}.$$

Применяя формулу (6), получаем:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \sqrt[4]{n^2 - 1} \cdot \sqrt{\frac{g}{R}}; \\ a &= \frac{\sqrt[4]{\left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2\right]^{-1} - 1}}{t_1} \sqrt{\frac{g}{R}}. \end{aligned} \quad (9)$$

С другой стороны, можно удобно определить максимальное значение n . Для этого измеряют, хотя бы тахометром, значение ω при установившейся скорости центрифуги. Обозначим эту величину $\omega_{\max}$ ¹⁾. Тогда, полагая $t = \infty$, согласно формуле (4) получим:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{a}{b}}. \quad (10)$$

Отсюда имеем

$$ab = \frac{a^2}{\omega_{\max}^2}. \quad (11)$$

Пользуясь формулами (7), (10), (11) и (9), находим окончательное значение n , выраженное через непосредственно измеряемые величины:

$$n = \sqrt{\frac{\omega_{\max}^4 R^2}{g^2} \left\{ \frac{1 - e^{-2 \frac{\sqrt[4]{1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2} - 1} \sqrt{\frac{g}{R}} t}}{t_1 \omega_{\max}} \right\}^4 + 1}. \quad (12)$$

Совершенно очевидно, что время t можно выражать в любых единицах. В данном случае удобно вместо обычных единиц ввести номера кадров кинофильма N . Это равносильно введению единицы времени, равной промежутку между двумя последующими кадрами. Как указывалось уже раньше, эта величина при описываемом исследовании равнялась около 1,5 сек.

¹⁾ Строго говоря, $\omega = \omega_{\max}$ лишь при $t = \infty$.

Если высота модели равна h , то очевидно высота эквивалентного натурального сооружения будет

$$H = nh. \quad (13)$$

Таким образом можно для любого кадра кинофильма рассчитать ту эквивалентную высоту сооружения, которая соответствовала бы действующим на модель силам.

На рис. 2 изображена вычисленная описанным путем зависимость между H и N , H здесь выражено в метрах.

Под графиком даны наиболее характерные моменты деформаций крутой насыпи из смеси 75% песка средней крупности и 25% глины при средней влажности около 15% к весу сухого грунта¹⁾. Примерный вид необрушенного и обрушенных профилей приведен также на рис. 3 и 4, где даны отдельные кинокадры из заснятого фильма.

Данный пример показывает, что здесь мы имеем преимущественно деформации и разрушения только при нарастающем значении H . При стабилизации H профиль насыпи также, по крайней мере в первом приближении, стабилизируется. Это, конечно, не должно обязательно иметь место во всех случаях, особенно при жирной глине.

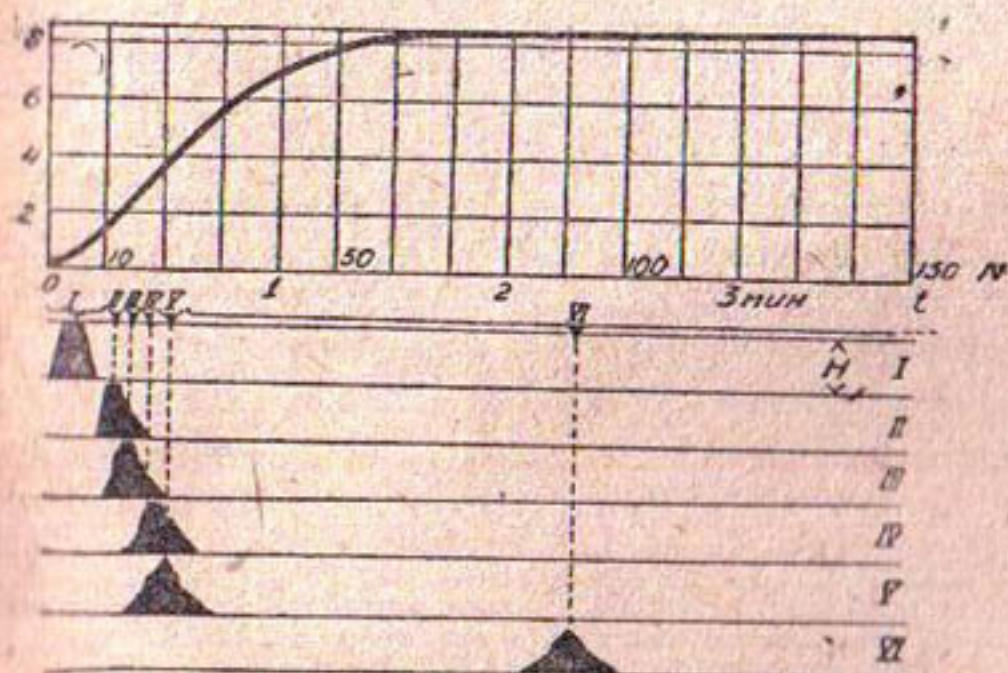


Рис. 2.



Рис. 3.

Приведенные здесь опытные данные, конечно, следует рассматривать только как общую иллюстрацию данного метода, окончательные результаты которого выяснятся после длительной работы с разнообразными грунтами и различными профилями моделей.

¹⁾ Точное значение влажности указать нельзя, ибо при центрифугировании в модели происходит сложное перераспределение воды, приближающееся к тому, что должно было бы получиться в большом сооружении.

РЕЗЮМЕ.

1. Здесь описана установка киноаппарата на центрифуге для испытания моделей земляных сооружений.

2. Выведено соотношение между силами, действующими на модель, и временем вращения центрифуги от момента ее пуска.

3. Описаны результаты предварительного экспериментирования.

Описанные эксперименты были осуществлены при участии Научно-исследовательского кинофотоинститута (НИКФИ) сотрудником этого Института В. И. Логиновым, которому автор рад выразить здесь свою признательность. Осуществление всей описанной здесь аппаратуры оказалось возможным благодаря энергичной помощи инж. И. В. Федорова, которому автор высказывает глубокую благодарность.



Рис. 4.

А. Я. Иоффе.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ГЛУБИНЫ СЛАБОГО ПЛАСТА, ЗАЛЕГАЮЩЕГО ПОД ЗЕМЛЯНЫМ ОТКОСОМ, НА ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ.

(Опыт теоретического исследования.)

Устойчивость земляного сооружения, расположенного на деформируемом (слабом) основании, определяется двумя факторами: осадкой, т. е. частичным погружением тела сооружения в основание, и сползанием откосов сооружения. Первое обстоятельство учитывается при принятии так называемых допустимых нагрузок на грунты (наибольшего давления, оказываемого сооружением на единицу поверхности основания без чрезмерной осадки и выпирания грунта), для установления которых существуют известные давно выработанные методы, а ныне начинает находить себе применение наиболее точный метод, основанный на испытании грунтов при помощи центрифуги¹⁾. Второе же обстоятельство, поскольку оно связано с характером основания, до самого последнего времени совершенно игнорировалось, и степень устойчивости откоса считалась независимой от свойств того основания, на котором стоит данный откос. Как показало, однако, простейшее обследование влияния слабого основания на устойчивость откоса²⁾, последняя может быть представлена следующим соотношением:

$$\alpha \leq \alpha_n, \quad (1)$$

где α_n означает угол устойчивого откоса грунта любого из геологических пластов, составляющих слабое основание.

Соотношение это справедливо постольку, поскольку выражает собой то положение, что откос, угол наклона которого к горизонту α не превосходит угла откоса наиболее слабого из грунтов основания, является безусловно устойчивым. Но так как безусловно устойчивый откос вооб-

¹⁾ Г. И. Покровский — Принципы моделирования оснований сооружений, Журнал технической физики, том IV, вып. 2, 1934 г.

²⁾ Проф. Г. И. Покровский — Об устойчивости откоса на слабом основании, Гидротехническое строительство, № 5, 1933 г. и настоящий сборник, статья первая, раздел шестой.

ще не совпадает с наиболее крутым устойчивым откосом (находящимся в состоянии своего предельного равновесия), то принятие соотношения (1) в качестве формулы для практических расчетов откосов на деформируемых основаниях неизбежно привело бы к излишнему и, что особенно важно, совершенно неопределенному запасу устойчивости по следующим соображениям:

1. Формула (1) не рассматривает, хотя и допускает возможность устойчивости откоса при условии $\alpha > \alpha_n$.

2. Формула (1) предполагает давление откоса как на поверхности основания, так и на той глубине, на которой находится данный слабый пласт, одинаковым и не принимает во внимание перераспределения давлений в массиве грунта с возрастанием глубины.

3. Формула (1) не учитывает сил сцепления в грунте.

Из всех приведенных здесь соображений наиболее существенным представляется второе. Рассмотрение возможных путей усовершенствования формулы (1) с указанной точки зрения, усовершенствования, связанного по необходимости с усложнением ее, и составляет предмет настоящей статьи.

При исследовании вопроса о влиянии глубины слабого слоя на устойчивость откоса следует исходить из того положения, что откос *A* на поверхности основания (схематический рис. 1), крутизна которого определяется величиной $\operatorname{tg} \alpha$, эквивалентен в отношении влияния этого слабого слоя некоторому воображаемому (всегда менее крутому) откосу *B* (рис. 1) на рассматриваемой глубине. Указанную эквивалентность надлежит понимать таким образом, что данный откос на поверхности и соответствующий воображаемый откос, расположенный на глубине некоторого слабого пласта, обуславливают на этой глубине одинаковое давление в грунте, которое и определяет в действительности устойчивость существующего откоса.

Давление как на поверхности, так и внутри массива грунта обыкновенно характеризуется некоторой эпюрой давлений, показывающей их величину в каждом месте. Поэтому для решения поставленного вопроса следует найти такой откос, эпюра давлений на поверхности основания которого совпадала бы с эпюрой давлений от данного откоса на глубине верхней поверхности слабого слоя. Тангенс угла этого воображаемого откоса и должен быть поставлен в формулу, соответствующую (1), на место тангенса угла фактического откоса, находящегося на дневной поверхности. Если последний угол составляет α , то эпюра единичных давлений P (рис. 2) на поверхности наклонена к горизонту под углом

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} m = \operatorname{arctg} (\gamma \operatorname{tg} \alpha), \quad (2)$$

где γ — вес единицы объема грунта. Ширина эпюры давлений совпадает с шириной данного земляного сооружения. Для того чтобы найти эпю-

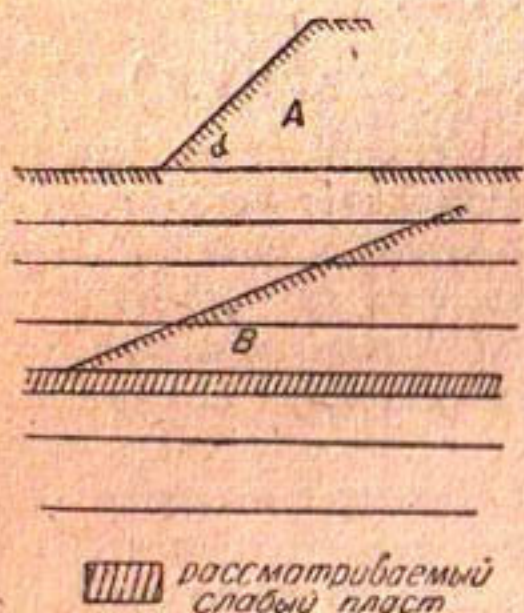


Рис. 1.

ру давлений на некоторой глубине в зависимости от эпюры давлений на поверхности грунта, необходимо воспользоваться данными, полученными проф. Н. М. Герсевановым при исследовании распределения напряжений в массиве грунта, вызванных внешней нагрузкой на поверхности. Здесь мы рассматриваем простейший случай, когда откос обрывается перпендикулярно к поверхности основания и соответствующая эпюра представляет собою прямоугольный треугольник. Расположим начало координат в подошве откоса и направим ось абсцисс по его ширине, а ось ординат вниз. Отсылая интересующихся методом вывода к оригинальной работе¹⁾, приведем здесь прямо окончательное уравнение эпюры вертикальных давлений (напряжений) в грунте N на глубине y , выведенное проф. Н. М. Герсевановым для данного случая. Оно имеет вид:

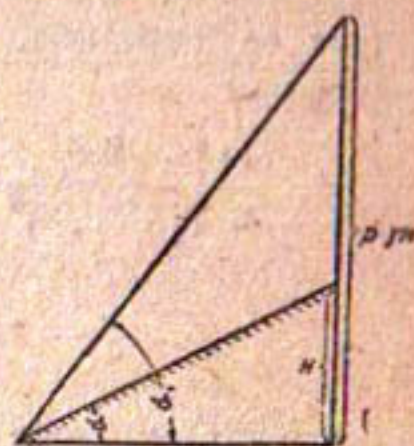


Рис. 2.

$$N = \frac{m}{\pi} \left[x \left(\operatorname{arctg} \frac{y}{x-b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x} \right) - \frac{by(x-b)}{(x-b)^2 + y^2} \right], \quad (3)$$

где b означает ширину основания откоса, а значение m вытекает из ур-ния (2). Для каждой глубины рассматриваемого слабого слоя y при данной ширине основания откоса b , очевидно, имеем:

$$N = F(x).$$

Отсюда наклон эпюры давлений к горизонту выразится на основании ур-ния (3), как

$$m' = \frac{\partial N}{\partial x}.$$

Дифференцируя ур-ние (3) по переменной x , получаем:

$$m' = \frac{m}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{y}{x-b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x} + \frac{xy}{x^2 + y^2} - \frac{xy}{(x-b)^2 + y^2} + \frac{by[(x-b)^2 - y^2]}{(x-b)^4 + 2y^2(x-b)^2 + y^4} \right\}. \quad (4)$$

Как показывает ур-ние (4), наклон эпюры давлений на каждой глубине зависит от положения отдельных точек в грунте на этой глубине, выражаемого величиной x . Так как для устойчивости откоса имеет значение наибольший наклон к горизонту эпюры давлений на глубине слабого слоя

$$m'' = m'_{\max},$$

¹⁾ Проф. Н. М. Герсеванов — Общий метод теории упругости. Определение напряжений в грунте при заданной нагрузке на поверхности, Сборник 1 трудов Всесоюзного института оснований сооружений, Госстройиздат, 1933 г.

то определяем m'' из условия:

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = 0.$$

Очевидно, что максимальный наклон эпюры давлений имеет место в точках ее перегиба. Выполняя дифференцирование уравнения (4), получаем уравнение:

$$\frac{m}{\pi} \left\{ \frac{2y^3}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{2y}{(x-b)^2 + y^2} + \frac{2xy(x-b) + 2by(x-b)^2}{[(x-b)^2 + y^2]^2} - \frac{4by(x-b)[(x-b)^2 - y^2]}{[(x-b)^2 + y^2]^3} \right\} = 0$$

геометрических мест точек массива грунта (в сечениях его вертикальными плоскостями), для которых наклон к горизонту эпюры давлений в грунте от откоса на его поверхности имеет максимальное значение. Уравнение это можно переписать в виде:

$$y^2[(x-b)^2 + y^2]^3 - (x^2 + y^2)^2[(x-b)^2 + y^2]^2 + (x^2 + y^2)^2[x(x-b) + b(x-b)^2] \times \\ \times [(x-b)^2 + y^2] - 2b(x-b)(x^2 + y^2)^2[x-b)^2 - y^2] = 0. \quad (5)$$

Каждой глубине слабого слоя y соответствует определенная абсцисса x точки грунта с наибольшим наклоном эпюры давлений. Ввиду совершенно очевидной невозможности общего решения уравнения (5) относительно x , его применение может быть рекомендовано в отдельных конкретных случаях при заданных численных значениях глубины наиболее слабого из геологических пластов, составляющих основание данного откоса, и высоты его $H = b \operatorname{tg} \alpha$, где α пусть само по себе неизвестно.

Так как графическое представление эпюр давлений в грунте от поверхностной нагрузки по прямоугольному треугольнику¹⁾ указывает на существование двух точек перегиба (двух максимумов наклона) этих эпюр, то следует ожидать, что уравнение (5) имеет лишь два различных вещественных решения. Приближенное решение его при подстановке частных значений величин y и H может быть вообще осуществлено с безусловно достаточной для практических расчетов точностью²⁾. Имея в виду, что больший максимум наклона эпюры соответствует обрыву нагрузки при абсциссе $x = b$, никогда не встречающемуся на практике, из двух значений x , получаемых в каждом случае при указанном выше приближенном решении уравнения (5), следует принимать в расчет то значение, которое дает меньшую величину m'' , т. е. значение отрицательное. Обозначая указанное решение через

$$x_m = \varphi_1(y, b) = \varphi_2(y, H, \alpha)$$

¹⁾ Д. Е. Польшин — Определение напряжений в грунте при загрузке части его поверхности, *ibid.*, стр. 53.

²⁾ Графическим путем или же методом Ньютона. На этих непосредственно практических моментах мы здесь вообще не будем останавливаться.

и подставляя в ур-ние (4), получаем:

$$m'' = \frac{m}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m - b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m} + \frac{x_m y}{x_m^2 + y^2} - \frac{x_m y}{(x_m - b)^2 + y^2} + \right. \\ \left. + \frac{by[(x_m - b)^2 - y^2]}{(x_m - b)^4 + 2y^2(x_m - b)^2 + y^4} \right\}. \quad (6)$$

Так как [аналогично (2)]

$$m'' = \gamma \operatorname{tg} \alpha'_{\max} = \gamma \operatorname{tg} \alpha'',$$

то на основании ур-ния (2):

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha''}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{m''}{m},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha'' = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m - b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m} + \frac{x_m y}{x_m^2 + y^2} - \frac{x_m y}{(x_m - b)^2 + y^2} + \right. \\ \left. + \frac{by[(x_m - b)^2 - y^2]}{(x_m - b)^4 + 2y^2(x_m - b)^2 + y^4} \right\}. \quad (7)$$

Подставляя полученное выражение вместо $\operatorname{tg} \alpha$ в соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha \leq k_n \approx \operatorname{tg} \alpha_n$$

(k_n — коэффициент внутреннего трения наиболее слабого из подстилающих грунтов), предшествующее выводу формулы (1) проф. Г. И. Покровского:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m - b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m} + \frac{x_m y}{x_m^2 + y^2} - \frac{x_m y}{(x_m - b)^2 + y^2} + \right. \\ \left. + \frac{by[(x_m - b)^2 - y^2]}{(x_m - b)^4 + 2y^2(x_m - b)^2 + y^4} \right\} \leq \operatorname{tg} \alpha_n,$$

приходим к условию устойчивости откоса на слабом основании в виде:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\pi \operatorname{tg} \alpha_n}{\left\{ \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m - b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m} + \frac{x_m y}{x_m^2 + y^2} - \frac{x_m y}{(x_m - b)^2 + y^2} + \right. \\ \left. + \frac{by[(x_m - b)^2 - y^2]}{(x_m - b)^4 + 2y^2(x_m - b)^2 + y^4} \right\}}$$

или в соответствии с формой соотношения (1):

$$\alpha \leq \operatorname{arctg} \frac{\pi \operatorname{tg} \alpha_n}{\left\{ \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m - b} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x_m} + \frac{x_m y}{x_m^2 + y^2} - \frac{x_m y}{(x_m - b)^2 + y^2} + \right. \\ \left. + \frac{by[(x_m - b)^2 - y^2]}{(x_m - b)^4 + 2y^2(x_m - b)^2 + y^4} \right\}}. \quad (8)$$

Из данного ур-ния видно, что при беспредельном возрастании глубины слабого слоя угол откоса стремится к прямому. Поскольку, однако, характер основания играет, как было указано в самом начале, хотя и весьма существенную, но все же не единственную роль в устойчивости расположенного на нем откоса, смысл ур-ния (8) заключается в том, что с повышением глубины слой слабого грунта постепенно перестает проявлять свое влияние, и откос определяется, главным образом, свойствами грунта, составляющего его тело.

При $y=0$ последние три члена в знаменателе обращаются в нуль, а первые два члена можно представить в виде:

$$\arctg\left(\frac{y}{x_m - b}\right)_{y=0} - \arctg\left(\frac{y}{x_m}\right)_{y=0} = \pi,$$

откуда получается формула (1).

Очевидно, что, зная геологический разрез основания, необходимо вообще рассматривать всегда тот слабый пласт с номером n , при котором правая часть ур-ния (8) имеет наименьшее значение.

В практике возведения земляных плотин или насыпей на слабых основаниях, требующей применения изложенных здесь выводов, ширина сооружения по гребню вследствие необходимого при этом малого наклона откосов всегда незначительна по сравнению с шириной по основанию, и профиль можно в известных пределах рассматривать как треугольный. Так как добавление второго земляного откоса в месте вертикального обрыва первого откоса не может внести существенных искажений в эпюру давлений в грунте около максимума ее наклона, то ур-ние (8) легко распространяется и на указанные практические случаи. Более или менее значительное затруднение может встретиться лишь при решении ур-ния (5) для определения величины x_m в функции искомого угла допустимого откоса α и последующего решения уравнения (7) или (8) относительно указанного угла.

Для более точного расчета следует составить общее уравнение эпюры давлений в грунте от нагрузки, расположенной по остроугольному треугольнику. При прежней координатной системе, начало которой расположено в подошве первого откоса, тангенс угла, образуемого эпюрой на поверхности основания, соответствующей второму откосу, с положительным направлением оси абсцисс, составит $m_n = -m_2 = -\gamma \operatorname{tg} \alpha_2$, где α_2 — угол второго откоса, а всякая абсцисса точек второй эпюры выразится $x_n = x - b_1 - b_2$, где b_1 и b_2 означают соответственно абсолютные величины ширины оснований первого и второго откосов. Тогда уравнение второй эпюры (в массиве грунта основания) примет в соответствии с (3) вид:

$$N_2 = \frac{m_2}{\pi} \left[(x - b_1 - b_2) \left(\arctg \frac{y}{x - b_1 - b_2} - \arctg \frac{y}{x - b_1} \right) - \frac{b_2 y (x - b_1)}{(x - b_1)^2 + y^2} \right]. \quad (9)$$

Если наклон эпюры давлений на поверхности, относящейся к первому откосу, обозначить m_1 , то уравнение результирующих эпюр

давлений внутри массива основания от плотины или насыпи треугольного профиля получится из ур-ний (3) и (9):

$$N = \frac{1}{\pi} \left[m_1 x \left(\operatorname{arctg} \frac{y}{x-b_1} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x} \right) + \right. \\ \left. + m_2 (x-b_1-b_2) \left(\operatorname{arctg} \frac{y}{x-b_1-b_2} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x-b_1} \right) - \right. \\ \left. - \frac{2\gamma Hy(x-b_1)}{(x-b_1)^2 + y^2} \right] \quad (10)$$

(по определению).

Из этого ур-ния нужно далее найти при помощи первой и второй частной производной N по x аналогично тому, как было указано выше, максимальные наклоны эпюры давлений в грунте на глубине соответствующего слабого слоя, относящиеся к каждому из двух откосов земляного сооружения. Значения этих максимальных наклонов нужно разделить соответственно на m_1 и m_2 и на полученные величины

$$\xi_1 = f_1(y, b_1, b_2, \dots) < 1 \text{ и } \xi_2 = f_2(y, b_1, b_2, \dots) < 1$$

разделить $\operatorname{tg} \alpha_n$ ⁴⁾, что даст в результате (после приравнивания) уравнения, определяющие тангенсы углов откос в α_1 и α_2 . Так как при расчетах в большинстве случаев задается не ширина по основанию, а высота сооружения H , то нужно подставлять вместо b_1 и b_2 в эти уравнения их значения по формулам:

$$b_1 = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha_1} \text{ и } b_2 = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha_2}$$

и затем уже последовательно решать их, как и ур-ния (7) или (8), относительно α_1 и α_2 .

Возникающие при подобных расчетах чрезвычайные математические трудности и сложности заставляют видеть здесь необходимый переход от теории к практике прежде всего в выработке упрощенных, удобных для всякого инженера-проектировщика приемов приближенного аналитического или графического решения ур-ний (5) и (8) или соответствующих им более сложных, как было только что изложено. Особенно желательным является при этом составление соответствующих номограмм, громадная практическая ценность, как и высокий современный уровень развития которых весьма наглядно проявляется в работе Д. Е. Польшина — Номограммы для расчета оснований (ibid.).

В заключение следует еще раз указать, что настоящая работа может рассматриваться лишь как попытка некоторого приближения к решению вопроса, в чрезвычайной степени сложного и многостороннего, и выразить глубокую благодарность проф. Г. И. Покровскому, по инициативе и под руководством которого она была выполнена.

⁴⁾ Индекс n относится лишь к подстилающим слоям, но не к самим откосам 1 и 2, считая от начала координат.

А. Я. Иоффе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ГРУНТАХ.

В нижеследующих строках мы пытаемся дать общее освещение явления трения грунтов с механической точки зрения и установить некоторые новые закономерности, вскрывающие качественные стороны данного большого и сложного вопроса.

Внутреннее трение в грунтах, сопровождающее скольжение одного слоя по другому, представляет собой, как известно, весьма сложный процесс, характеризующийся нарушением структуры грунтового комплекса в пределах более или менее значительной зоны деформации по обе стороны той фиктивной плоскости сдвига, вдоль которой действует соответствующая тангенциальная сила.

Обстоятельство непрерывного перерасположения частиц грунта, вынужденных совершать беспорядочные зигзагообразные движения под действием сдвигающей силы, дало нам при этом возможность ввести понятие о турбулентном характере явления трения в грунте и установить чисто качественную картину зависимости коэффициента внутреннего трения от величины элементов грунтового скелета¹⁾.

Это же обстоятельство обуславливает колебания силы трения в процессе скольжения грунта, амплитуда и частота которых определяются величиной отдельных частиц, и приводит к ее постепенному нарастанию до некоторого максимального значения, соответствующего безостановочному сдвигу (так называемому срезу грунта). Менее значительные силы вызывают лишь конечные смещения слоя грунта.

Только что сказанное объясняется тем, что при сдвиге в результате перерасположения частиц образуются новые их группировки, более устойчивые, нежели те, с разрушения которых данный сдвиг начался. Обычно при определении коэффициента внутреннего трения грунта, испытывающего то или иное внешнее давление, перпендикулярное к направлению сдвига, принимается именно указанное выше максимальное значение силы трения, хотя деформации сдвига происходят и ранее

¹⁾ А. Я. Иоффе — Влияние механ. состава на внутреннее трение грунтов, Бюллетень Научно-исслед. ин-та гидротехники и гидрогеологии, № 6, 1932 г.

достижения этого значения. Полученные таким путем коэффициенты трения применяются затем в практических расчетах.

Здесь мы пользуемся случаем указать на существенную неправильность подобного решения вопроса о величинах сопротивления грунта сдвигающим усилиям. Сдвиг грунта на большее или меньшее расстояние, знаменующее фактическое разрушение соответствующего инженерного сооружения, может в действительности произойти при сдвигающих силах, много уступающих временному сопротивлению грунта, определяемому в лаборатории при испытаниях грунта на срез, тем более, что и применяемых для этой цели приборах перерасположение зерен, неразрывно связанное со всяким сдвигом грунта, значительно затруднено по сравнению с естественными условиями. Указанное обстоятельство является вообще непосредственным следствием прерывной структуры грунтового комплекса и заставляет полагать, что ряд катастроф, происшедших с различными сооружениями и в особенности с земляными плотинами, имеет своей причиной отождествление допустимых с точки зрения безопасности и устойчивости сдвигающих нагрузок на грунт в основании или в теле сооружения с его временным сопротивлением скольжению.

Вопрос в динамике изменения силы трения на протяжении сдвига грунта, поставленный и теоретически решенный в первом приближении в весьма оригинальной и интересной работе проф. Г. И. Покровского¹⁾, которым были также намечены принципы и пути экспериментальных работ в этой области²⁾, изучается в настоящее время в лаборатории физики и механики грунтов Института „Водгео“ инж. И. В. Федоровым. Полученные последним до сих пор результаты, подтверждающие основные выводы проф. Г. И. Покровского, являются, однако, еще слишком недостаточными для их опубликования.

Таким образом мы устанавливаем, что трение в грунтах принципиально отлично по своей природе от обычного трения между твердыми телами и до известной степени приближается к внутреннему трению жидкостей и газов. Однако специфический характер внутреннего трения в грунтах ставит перед исследователем некоторые вопросы, которые чрезвычайно затруднительно отнести к случаю жидкостей или газов и которые представляются весьма существенными с точки зрения практики. Трение в грунтах в высокой степени зависит от свойств отдельных частиц, составляющих в совокупности твердую фазу или так называемый скелет грунта, и в особенности от свойств их поверхности, тогда как молекулы всякой жидкости или газа считаются вполне идентичными.

В связи со сказанным естественно поставить вопрос о зависимости коэффициента внутреннего трения грунта от коэффициента трения веще-

1) Г. И. Покровский — О применении статистических закономерностей к явлению трения в грунтах, Журнал технической физики, том III, вып. 2—3, 1933 г.

2) Экспериментирование основано при этом на принципе вращательного скольжения одного слоя грунта по другому с постоянной малой скоростью, достигаемой при помощи граммофонного механизма. Сдвигающая сила передается на ось вращения через натянутую струну и измеряется динамометром, а также автоматически регистрируется самопишущим прибором. Смещение грунта может при этом происходить на любое расстояние.

ства его частиц (при данной степени шероховатости поверхности). Здесь следует указать, что установление хотя бы самого общего характера этой зависимости возможно лишь при рассмотрении простейших схем явления, и мы имеем ряд примеров¹⁾, свидетельствующих о том, что подобные схемы в применении к грунтам способны давать весьма близкое изображение действительных соотношений, во всяком случае с качественной стороны.

Предположим, что грунт состоит из шарообразных зерен одинакового радиуса, центры которых расположены в вертикальных плоскостях.

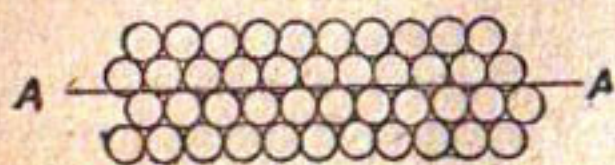


Рис. 1.

Тогда сечение вертикального моногранулярного слоя такой плоскостью изобразится так, как представлено на рис. 1, причем сечения отдельных частиц (гранул) расположены в плоскости наиболее тесно. Горизонтальная линия AA показывает плоскость сдвига, совпадающую

с направлением действия сдвигающей силы. Если в плоскости сдвига укладывается n зерен, то действующая в ней нормальная сила

$$P = \sum p = np$$

и тангенциальная сдвигающая сила

$$Q = \sum q = nq.$$

Здесь p и q означают соответственно нормальную и тангенциальную силу, действующие на каждое отдельное зерно. Сила Q складывается обыкновенно из внешней нагрузки на поверхности грунта, веса слоя грунта над плоскостью сдвига и внутреннего капиллярного давления в грунте, вызванного кривизной менисков, ограничивающих жидкую фазу грунтового комплекса от газообразной²⁾. Исходя из приведенных выше соот-

¹⁾ Г. И. Покровский и В. Г. Булычев — О силах сцепления в грунтах, Сборник 1 трудов Всесоюзного института оснований сооружений, Госстройиздат, 1933 г.

²⁾ Подробно рассмотрено в работе проф. Г. И. Покровского — Капиллярные силы в грунтах, изд. Гидротехгеоинститута, вып. 15, 1933 г.

Для определения относительного объема воздуха в грунте (свободной пористости) по данным, получаемым обычно в результате простейших анализов грунтов, мы предлагаем формулу, выведенную совершенно элементарным путем и впервые приведенную в отчете автора о механических исследованиях плавунки Подмосковского бассейна (рукопись, 1932 г.). Она имеет вид:

$$v = 1 - \frac{\delta(\sigma\gamma + \Delta_t)}{\Delta_t\gamma(1 + \sigma)},$$

где v — свободная пористость грунта,

δ — объемный вес грунтового комплекса,

σ — весовой коэффициент влажности,

γ — удельный вес скелета и

Δ_t — воды при данной температуре t .

В частном случае, когда σ соответствует максимальному содержанию воды, неподвижной относительно скелета, свободная пористость обращается в так называемую активную пористость грунта, представляющую большое значение в теории фильтрации.

ношений, коэффициент внутреннего трения грунта, представляющий собой отношение сдвигающей силы к нормальной, можно выразить так:

$$\kappa = \frac{q}{p}, \quad (1)$$

т. е. рассматривать лишь систему двух взаимодействующих зерен в плоскости сдвига. Такая система изображена в начальный момент скольжения на рис. 2. В соответствии с условиями расположения зерен, представленными на рис. 1, угол α , образуемый линией центров с вертикалью, проходящей через центр нижнего зерна, составляет здесь $30^\circ = \frac{\pi}{6}$.

Силу p , действующую на верхнее сдвигаемое зерно, раскладываем на две взаимно перпендикулярные составляющие, одна из которых совпадает с направлением линии центров, т. е. перпендикулярна в каждый момент к направлению движения зерна. Составляющие эти обозначим соответственно через p_1 и p_2 , как показано на рисунке, и будем иметь:

$$p_1 = p \cos \alpha,$$

$$p_2 = p \sin \alpha.$$

Аналогичное построение делаем для силы q и получаем:

$$q_1 = q \sin \alpha$$

$$q_2 = q \cos \alpha.$$

Отсюда сила μ , прижимающая верхнее зерно к нижнему, и сила γ , фактическидвигающая его, выразятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= p_1 + q_1 = p \cos \alpha + q \sin \alpha, \\ \gamma &= q_2 - p_2 = q \cos \alpha - p \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Между силами μ и γ существует такое соотношение:

$$\gamma = f \mu, \quad (3)$$

весьма простое по форме, но недостаточно определенное потому, что при современном уровне знаний о грунтах неизвестно, какое значение следует приписывать коэффициенту трения материала зерен f , заключающемуся, очевидно, между соответствующими коэффициентами трения при скольжении и при качении, т. е. представляющему собой коэффициент качения, сопровождающегося большим или меньшим скольжением.

Этот вопрос не имеет принципиального значения для наших выводов и потому оставляется здесь вообще в стороне. Заметим только, что при больших значениях нажимающей силы и сильном уплотнении грунта взаимное трение его зерен практически представляет собой почти чистое скольжение.

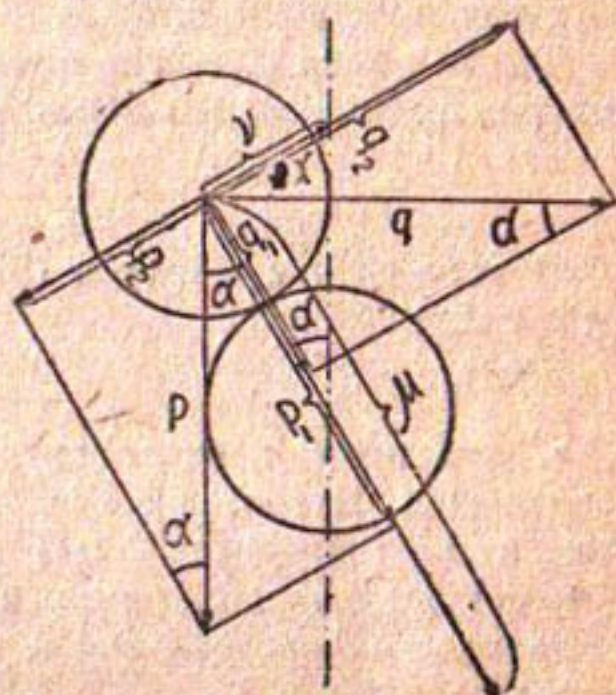


Рис. 2.

Подставляя значения γ и μ из (2) в (3), имеем:

$$q \cos \alpha - p \sin \alpha = f(p \cos \alpha + q \sin \alpha)$$

или

$$q(\cos \alpha - f \sin \alpha) = p(\sin \alpha + f \cos \alpha). \quad (4)$$

Из формул (1) и (4) получаем окончательно:

$$\kappa = \frac{\sin \alpha + f \cos \alpha}{\cos \alpha - f \sin \alpha}. \quad (5)$$

Полученная зависимость показывает, что хотя внутреннее трение в грунтах носит совершенно иной и несравненно более сложный характер, нежели трение в случае твердых тел, тем не менее тангенциальная сила, совпадающая с общим направлением сдвига, остается и здесь пропорциональной нормальной силе, что, как известно, подтверждается достаточно точно и опытом.

Теоретически f может иметь любое значение. В частности, при некотором расположении зерен может случиться, что

$$f = \operatorname{ctg} \alpha.$$

В этом случае формула (5) дает, независимо от величины нажимающей силы:

$$\kappa = \infty,$$

т. е. практически сдвиг грунта может произойти лишь в результате разрушения материала зерен нижнего слоя и среза их верхних сегментов. Указанный (парадоксальный) вывод представляется весьма интересным с точки зрения теоретических основ физики. Дальнейшая же интерпретация его и углубление в существо вопроса не могут войти в рамки настоящей статьи ¹⁾.

Коэффициент внутреннего трения грунта непрерывно изменяется, пока верхнее зерно передвигается по нижнему и угол α меняется в пределах от $\frac{\pi}{6}$ до $-\frac{\pi}{6}$ ²⁾. После этого данное верхнее зерно вступает в соприкосновение с другим нижним зерном и располагается относительно него в первый момент так же, как относительно первого зерна в начале сдвига, и угол α мгновенно изменяется от $-\frac{\pi}{6}$ до $\frac{\pi}{6}$. Поэтому в соответствующих точках функция коэффициента трения от пройденного расстояния при сдвиге претерпевает разрыв. Обычно подобные периодические скачки коэффициента трения нивелируются неоднородностью состава и струк-

¹⁾ Это неизбежно завлекло бы нас далеко в совершенно специальную и отвлеченную область. Однако разработка вопроса сама по себе может явиться содержанием отдельного исследования в общем (до некоторой степени гносеологическом) разрезе статистической механики грунта.

²⁾ Вывод для отрицательных значений α совершенно аналогичен и приводит к тому же результату, так что формула (5) справедлива для всего рассматриваемого интервала.

туры грунта, но в большей или меньшей степени наблюдаются во всех случаях.

Для того чтобы установить общие свойства функции $\kappa = F(\alpha)$ при $f = \text{const}$ в интервале непрерывности, т. е. в пределах от $\frac{\pi}{6}$ до $-\frac{\pi}{6}$, найдем первую производную:

$$\begin{aligned} \frac{d\kappa}{d\alpha} &= \frac{(\cos \alpha - f \sin \alpha)(\cos \alpha - f \sin \alpha) - (\sin \alpha + f \cos \alpha)(-\sin \alpha - f \cos \alpha)}{(\cos \alpha - f \sin \alpha)^2} = \\ &= \frac{(\cos \alpha - f \sin \alpha)^2 + (\sin \alpha + f \cos \alpha)^2}{(\cos \alpha - f \sin \alpha)^2} = 1 + \kappa^2 > 0, \end{aligned} \quad (6)$$

так как κ^2 всегда положительно. Следовательно, рассматриваемая функция является возрастающей. Так как угол α при движении в пределах одного зерна уменьшается с пройденным расстоянием или со временем сдвига, то зависимость коэффициента внутреннего трения от указанных величин убывающая. Когда внутренняя функция $\alpha = \varphi(\tau)$, где τ может вообще означать либо путь, либо время, претерпевает разрыв, коэффициент трения $\kappa = f[\varphi(\tau)]$ мгновенно возрастает от минимума до максимума и затем снова следует зависимости (5). Таким образом изменение коэффициента трения во время скольжения подчиняется безусловно некоторому периодическому закону. Рассмотрим также вторую производную, для чего продифференцируем выражение (6):

$$\begin{aligned} \frac{d^2\kappa}{d\alpha^2} &= 2\kappa \frac{d\kappa}{d\alpha} = 2\kappa(1 + \kappa^2) = \\ &= \frac{2(\sin \alpha + f \cos \alpha)[(\cos \alpha - f \sin \alpha)^2 + (\sin \alpha + f \cos \alpha)^2]}{(\cos \alpha - f \sin \alpha)^3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Нетрудно показать, что выражение, стоящее в квадратных скобках, равняется

$$1 + f^2 > 0.$$

Поэтому, пока

$$\sin \alpha + f \cos \alpha > 0,$$

кривая рассматриваемой функции вогнута кверху; при

$$\sin \alpha + f \cos \alpha < 0$$

она выпукла и при

$$\sin \alpha + f \cos \alpha = 0,$$

т. е. при

$$\kappa = 0,$$

[(5)] имеет точку перегиба. При этом

$$\alpha = \arctg(f).$$

Так как предельный отрицательный угол $\alpha = -\frac{\pi}{6}$, то в случае

$$f > -\operatorname{tg} \alpha_{\min} = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

кривая точек перегиба не имеет, и k сохраняет все время положительное значение (при очевидном условии $f < \operatorname{ctg} \alpha$). Заметим также относительно формулы (5) следующее. При $\alpha = 0$ она дает $k = f$, что вообще должно быть и непосредственно ясно. В том случае, когда сила,двигающая зерно, равна нулю, т. е. тангенциальные составляющие сил p и q равны по абсолютной величине

$$q \cos \alpha = p \sin \alpha$$

[из (2)] или

$$k = \operatorname{tg} \alpha,$$

она приводит также к очевидному результату, что скольжение было бы возможно лишь при условии $f = 0$. Укажем еще, что для некоторых (структурных) исследований, когда k и f являются величинами, известными из опыта, может оказаться более удобным представить формулу (5) в виде:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{k - f}{1 + kf}. \quad (8)$$

Исходя из условий, положенных в основу вывода формулы (5), следовало бы допустить, что весьдвигающийся слой грунта воспроизводит в точности все движения своих нижних зерен, непосредственно трущихся по зернам неподвижного слоя. При этом зернадвигающегося слоя, переходя от наиболее плотного (в вертикальных плоскостях) к наиболее рыхлому расположению и обратно, должны периодически подниматься и опускаться на высоту h , определяемую согласно построению на рис. 2 так:

$$h = R(2 - \sqrt{3}) = 0,268 R, \quad (9)$$

где R — радиус шарообразного зерна. В действительности, подобные вертикальные перемещения частиц грунта при трении практически локализируются в пределах указанной ранее ограниченной зоны деформации и приводят к беспорядочному перераспределению и постепенному разделению частиц по обе стороны плоскости сдвига¹⁾ и соответствующему уплотнению грунта в непосредственной ее близости. Это обстоятельство связано с явлением так называемой пришлифовки поверхностей внутреннего трения, рассмотренным в упомянутой вначале работе проф. Г. И. Покровского.

¹⁾ „Trennung nach einer Fläche“ по выражению проф. К. Terzaghi в его фундаментальном труде *Erdbaumechnik*, Leipzig und Wien, 1925, ныне изданном в русском переводе под редакцией проф. Н. М. Герсевича.

Для того чтобы получить теперь общее представление о качественном характере зависимости коэффициента внутреннего трения грунта от коэффициента трения его материала, необходимо исключить пертурбирующее влияние переменного угла взаимного расположения частиц α , т. е. найти среднее значение функции k согласно формуле (5) в интервале от $\alpha = \frac{\pi}{6}$ до $\alpha = -\frac{\pi}{6}$.

Так как указанные интервалы должны в точности повторяться в течение всего процесса сдвига, то k сохраняет (вообще говоря, конечно, лишь в первом приближении) при скольжении это среднее свое значение. Таким образом, подразумевая под k его среднее значение, имеем:

$$k = \frac{1}{-\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{6}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{-\frac{\pi}{6}} \frac{(\sin \alpha + f \cos \alpha) d\alpha}{\cos \alpha - f \sin \alpha}; \quad (10)$$

Здесь множитель, стоящий перед интегралом, равняется $-\frac{3}{\pi}$. Нетрудно видеть, что числитель подынтегрального выражения представляет собой дифференциал знаменателя с обратным знаком, и потому уравнение (10) можно переписать в виде:

$$k = \frac{3}{\pi} \int_{\left(\frac{\pi}{6}\right)}^{\left(-\frac{\pi}{6}\right)} \frac{d(\cos \alpha - f \sin \alpha)}{\cos \alpha - f \sin \alpha} = \frac{3}{\pi} \ln (\cos \alpha - f \sin \alpha) \Big|_{\alpha = \frac{\pi}{6}}^{\alpha = -\frac{\pi}{6}}.$$

Подставляя пределы, находим:

$$k = \frac{3}{\pi} \ln \frac{\cos \left(-\frac{\pi}{6}\right) - f \sin \left(-\frac{\pi}{6}\right)}{\cos \frac{\pi}{6} - f \sin \frac{\pi}{6}} = \frac{3}{\pi} \ln \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{f}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{f}{2}}$$

и окончательно:

$$k = \frac{3}{\pi} \ln \frac{\sqrt{3} + f}{\sqrt{3} - f}. \quad (11)$$

С точностью до 5% первым множителем в данной формуле можно пренебречь. Из формулы (11) следует, что значения k имеют физический смысл, пока

$$f < \sqrt{3}.$$

В действительности, значения k всегда больше теоретических, соответствующих формулам (5) и (11), так как трение осуществляется

между значительно бóльшим количеством частиц грунта, составляющих зону деформации сдвига, нежели $2l$, как было положено при выводе этих формул¹⁾. Кроме того последние не отражают и не учитывают многих особенностей, характеризующих и влияющих в действительности на процесс внутреннего трения. Таким образом область вопросов, к которым вообще могут быть применены подобные элементарные схемы весьма ограничена, и для более глубокого выявления основных сторон и свойств явлений, связанных с внутренним трением в грунтах, необходимо принять какие-то иные исходные предпосылки и точки зрения на рассматриваемый предмет.

Такой точкой зрения прежде всего является статистическая, последовательно проведенная в первой упомянутой здесь работе проф. Г. И. Покровского. Другая принципиальная точка зрения может основываться на рассмотрении грунта как прерывной корпускулярной среды и на установлении общей физической аналогии между магнитными и грунтовыми явлениями и свойствами.

¹⁾ Поэтому отклонения k от его среднего значения относительно невелики и не искажают качественного характера зависимости $k = \phi(f)$.

В. С. Истомина.

БЫСТРОТОКИ ПЕРЕМЕННОЙ ШИРИНЫ ¹⁾.

Устройство быстротоков переменной ширины так же, как и быстротоков постоянной ширины, применяется для сброса некоторого расхода воды из верхнего бьефа или канала в нижний. Преимущество первых перед вторыми заключается в том, что изменением ширины поперечного сечения быстротока по длине можно получить любую глубину в быстротоке без изменения шероховатости его стенок.

Такое получение нужной глубины желательно в конце быстротока для лучшего сопряжения с глубиной нижнего канала, которая в некоторых случаях может быть настолько мала, что допустит образование отогнанного прыжка в нижнем бьефе. Для уничтожения возможности возникновения прыжка и изменяется сечение быстротока.

1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА.

Для расчетов быстротоков переменной ширины существует несколько методов. Почти все они исходят из основного уравнения установившегося, медленно изменяющегося неравномерного движения:

$$i_0 = \alpha \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{v^2}{C^2 R}.$$

Некоторые из способов расчета, как например проф. Журин ²⁾ и инж. Леви ³⁾, позволяют провести расчет быстротока переменной ширины для заданного расхода лишь с одной только принятой глубиной

¹⁾ Работа по исследованию быстротоков переменной ширины выполнялась в Гидротехгеоинституте по заданию Водоканалпроекта. Настоящая ее часть представляет экспериментальную проверку методов расчета на модели в лаборатории.

²⁾ Журин В. Д. — Элементарная практическая гидравлика, 1928 г.; Ахутин А. Н. — Рабочая книга по специальному курсу гидравлики, 1931 г.

³⁾ Леви И. И. — Расчет быстротоков переменного сечения, Вестник ирригации, № 6, 1925 г.; Леви И. И. — О неравномерном движении жидкости в открытых руслах, Вестник ирригации, № 2, 1928 г.; Чертоусов М. Д. — К вопросу о гидравлическом расчете быстротоков переменной ширины, Известия сектора гидротехники и гидротехнических сооружений, вып. XXII, 1930 г.; Замарин Е. — Гидротехнические сооружения, т. 1, 1932 г.

по всей длине быстротока. Ряд же других методов расчета дает возможность провести исследования гидравлической работы быстротока при любых видах кривой свободной поверхности воды в быстротоке.

К таким способам расчета относятся следующие:

1. Акад. Павловского Н. Н.¹⁾.

2. Инж. Хестеда (собственно приспособление к расчету быстротоков переменной ширины его способа построения кривых подпора и спада)²⁾.

3. Инж. Мосткова³⁾ — расчет быстротоков переменной ширины предложен им как один из вариантов применения его способа графического интегрирования ур-ния неравномерного движения:

$$i = a \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{v^2}{C^2 R}.$$

4. Инж. Крицкого С. Н.⁴⁾.

1. Метод акад. Павловского состоит в том, что строится ряд кривых свободных поверхностей потока, вычисленных по одному из известных способов для различных предполагаемых ширин быстротока, и наносится на один и тот же график (рис. 1)⁵⁾. Для получения формы быстротока в плане проводят через все нанесенные кривые желательную кривую свободной поверхности воды в быстротоке. Точки пересечения пучка кривых свободных поверхностей для различных ширин и желательной кривой свободной поверхности дадут необходимые размеры быстротока.

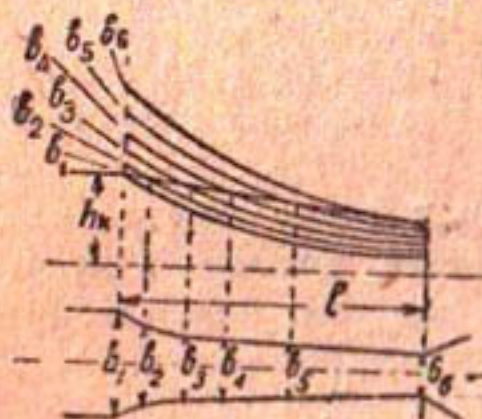


Рис. 1.

Метод акад. Павловского — графо-аналитический, что, однако, не является недостатком его,

так как он дает не только весьма наглядное решение (графичность его), но позволяет после первой прикидки размеров быстротока уточнить место пересечения кривых путем вычисления, а тем самым уточнить и размеры быстротока. Условность этого метода заключается в предположении о тождественном поведении потока в местах пересечения кривых свободных поверхностей, находящегося в условиях движения по каналу переменной ширины, с потоками, течение которых происходит по каналам постоянного сечения.

¹⁾ Проект орошения 500 000 десятин Голодной степи, 1915—16 г. Общая пояснительная записка; Чертоусов М. Д. — вышеназванная статья; Ахутина А. Н. — вышеназванная книга.

²⁾ Husted A. — New Method Computing Backwater and Drop-Downcurves, Eng. N. Recod № 12, 1924 г., стр. 719—22; изложение этого метода приведено в вышеназванной книге проф. А. Н. Ахутина.

³⁾ Графическая гидравлика неравномерного движения доложена 3/XI 1930 г. в гидравлико-математической секции Государственного гидрологического института в Ленинграде и 10/VII 1932 г. в Институте гидротехники Главэнерго в Ленинграде, в настоящее время находится в печати.

⁴⁾ О расчете каналов переменной ширины, Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник, № 4, 1932 г.

⁵⁾ Заимствован из рабочей книги по спец. курсу гидравлики проф. А. Н. Ахутина, 1931 г., стр. 106.

2. Метод Хестеда основан на применении ур-ния Бернулли для 2 сечений потока:

$$h_1 + i_0 l + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_T,$$

где h — глубина потока, v — скорость, i_0 — уклон канала, l — расстояние между двумя сечениями, h_T — потеря на трение на участке длиной l ; индексы 1 относятся к первому сечению, индексы 2 — ко второму.

Если выразить потери на трение $h_T = i_T l$ как потерю напора на единице длины, то предыдущее ур-ние можно переписать в следующем виде:

$$\left(h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) = l(i_0 - i_T),$$

т. е. в левой части ур-ния будем иметь изменение удельной энергии на длине l , а в правой разность уклона канала и уклона трения, умноженную на длину участка. Полученное ур-ние можно решить путем подбора глубины во 2-м сечении, имея заданную величину глубины в 1-м. Уклон трения определяется, как для потока при равномерном режиме:

$$i_T = \frac{v^2}{C^2 R},$$

где величины v , C , R берутся средними на участке 1 — 2.

Путем применения приведенных ур-ний от одного сечения к другому вдоль потока можно получить кривую свободной поверхности.

Недостатком этого метода является приближенность его, благодаря перенесению потерь на трение в потоке при равномерном режиме в поток, находящийся в условиях режима неравномерного, причем потери считаются по среднему сечению на принятом участке.

3. Метод инж. Мосткова графического интегрирования ур-ния неравномерного движения

$$i = \frac{v^2}{C^2 R} + \alpha \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

включается в построении на одном и том же чертеже зависимостей уклонов от глубин $i = f(h)$ и кривой удельной энергии $E = f(i)$ для заданного расхода и в нахождении Δh соответствующего первому $\left(\frac{v^2}{C^2 R} \right)$ и второму $\left[\alpha \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right]$ члену основного ур-ния неравномерного движения.

Кривая зависимости $i = f(h)$ получается из ур-ния $i = \frac{v^2}{C^2 R}$, где v , C , R берутся средними на выбранной участке (при заданном рас-

ходе Q и ширине канала b), изображение $i=f(h)$ см. на рис. 2¹⁾. Зная h , можно определить второй член удельной энергии потока $E = h + a \frac{v^2}{2g}$, который $\left(a \frac{v^2}{2g}\right)$ и откладывается в соответствующем масштабе от данной точки кривой $i=f(h)$. Таким образом строится зависимость $E=f(i)$ (рис. 2).

На линии равномерного режима $I-I$ (h_0 — глубина при равномерном режиме, i_0 — соответствующий ему уклон) откладывается глубина h_2 в начальном сечении (точка A). Из точки A под углом δ , определяемом из соотношения $\operatorname{tg} \delta = \Delta s \frac{\lambda}{\lambda m}$ проводится прямая до пересечения с кривой

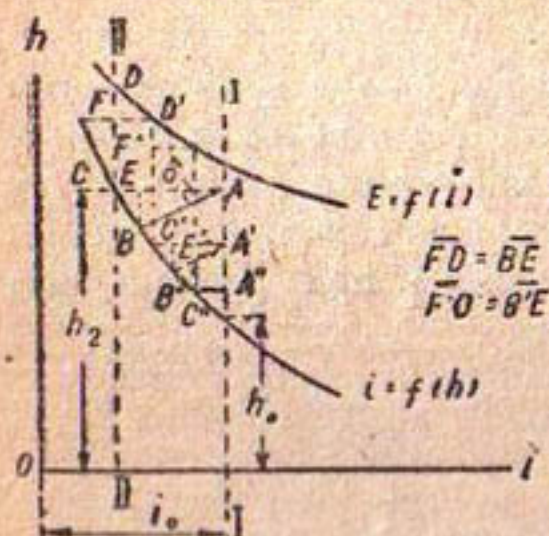


Рис. 2.

вой в точке B (Δs — длина участка, в конце которого нужно определить глубину потока; λh — масштаб высот на графике, $m\lambda$ — масштаб уклонов). Величина BE будет равна изменению глубины без учета

восстановления живой силы $a \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$. Для

учета же этой величины BE откладывается от точки D , принадлежащей кривой $E=f(i)$, $DF=BE$ и проводится горизонтальная линия до пересечения в точке D' . Затем из точки D' проводится вертикальная линия до пересечения с кривой $i=f(h)$ и сносится на линию $I-I$, где точка A' определит полученную глубину в конце участка Δs .

Для расчета быстротока переменной ширины методом инж. Мосткова приходится разбивать быстроток по длине на ряд участков длиной Δs , считать, что на этом участке имеется какая-то средняя ширина сечения, а затем строить ряд кривых для выбранных участков.

К недостаткам метода инж. Мосткова следует отнести, во-первых, предположение, что канал переменной ширины будет работать на отдельных участках как канал с средним сечением на этом участке, а также характер графического решения задачи, при котором неудачно выбранный масштаб может дать недостаточно точные результаты.

4. Метод инж. Крицкого основан так же, как и метод акад. Павловского и инж. Мосткова, на уравнении неравномерного движения:

$$i_0 = \frac{dh}{ds} + \frac{avdv}{gds} + \frac{v^2}{C^2R}.$$

При расчете каналов переменной ширины инж. Крицкий предлагает заменить влияние изменения ширины соответствующим изменением уклона дна. Таким образом вместо быстротока переменной ширины при-

¹⁾ Заимствован из вышеназванной работы инж. Мосткова. Построение ведется для кривой подпора, подобное построение делается и для кривой спада.

задают рассчитывать фиктивный канал — модель с эквивалентным уклоном дна, который определяется по формуле:

$$I_0 = i_0 + \frac{\alpha}{g} \frac{Q^2}{\omega^3} h \frac{db}{ds}.$$

Расчет по этому методу ведется для отдельных участков канала Δs по среднему сечению на данной длине в следующем порядке: выбрав очертание быстротока в плане и зная начальную глубину в быстротоке h_1 , задаются значением глубины h_2 в конце участка Δs , затем по средним величинам $h_{cp} = \frac{h_1 + h_2}{2}$ и $b_{cp} = \frac{b_1 + b_2}{2}$ из вышеприведенного уравнения «эквивалентного уклона» находят I_0 , и по найденной величине уклона I_0 и средней ширине b_{cp} определяется глубина h_2 ; если она отличается от принятой h_2 , то расчет повторяется с другими значениями h_2 .

Недостатком описанного метода для решения настоящей задачи (нахождение вида кривой свободной поверхности при заданном очертании быстротока), являются, с одной стороны, расчет фиктивного канала — модели по среднему участку на некоторой длине Δs , а с другой стороны, длительность вычислений и большое количество производимых при этом операций.

2. ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА.

Опыты по исследованию быстротоков переменной ширины ставились в гидротехнической лаборатории научно-исследовательского отдела Военно-инженерной академии (быв. ВИСУ). В бетонном лотке лаборатории был установлен деревянный лоток общей длиной 7 м (рис. 3). Длина собственно быстротока, который служил для опытов, была 6 м, горизонтальная часть лотка, длиной 1 м, являлась подходом к быстротоку. Сечение опытного лотка было взято прямоугольным для облегчения подсчетов при проверке методов расчета и для более легкого выполнения самой модели. Размеры поперечного сечения лотка следующие: подходной участок (на длине 1 м) — ширина $b = 0,40$ м, одинаковая по всей длине, высота бортов в начале подхода $h_H = 0,40$ м, в конце $h_K = 0,25$ м; быстроток (по длине 6 м) — ширина в начале лотка $b_H = 0,40$ м, в конце $b_K = 0,20$ м, высота бортов $h = 0,25$ м по всей длине. Подходной участок, как указано выше, был горизонтален, уклон же быстротока изменялся при опытах. Исследования проведены для уклонов $i_0 = 0,0990$ (серия 1), $i_0 = 0,0691$ (серия 2), $i_0 = 0,0374$ (серия 3).

Вода в опытный лоток подавалась через голову бетонного лотка, куда она попадала из напорного бака лаборатории. Из головы бетонного лотка, проходя через мерный водослив, вода поступала в голову модели, которая была образована путем перегораживания части бетонного лотка (рис. 3). Для получения плавного входа в опытный лоток у входного отверстия были устроены закругленные открышки.

Материалом для изготовления модели служили 2-дюймовые доски, которые были распилены на бруски размерами $\approx 0,10$ м. Соединение брусков произведено стяжкой их болтами (поперек дна и бортов) с проклейкой. Хорошо проструганные и пригнанные бруски лотка были прошпаклеваны и как внутри, так и снаружи окрашены эмалевой краской.

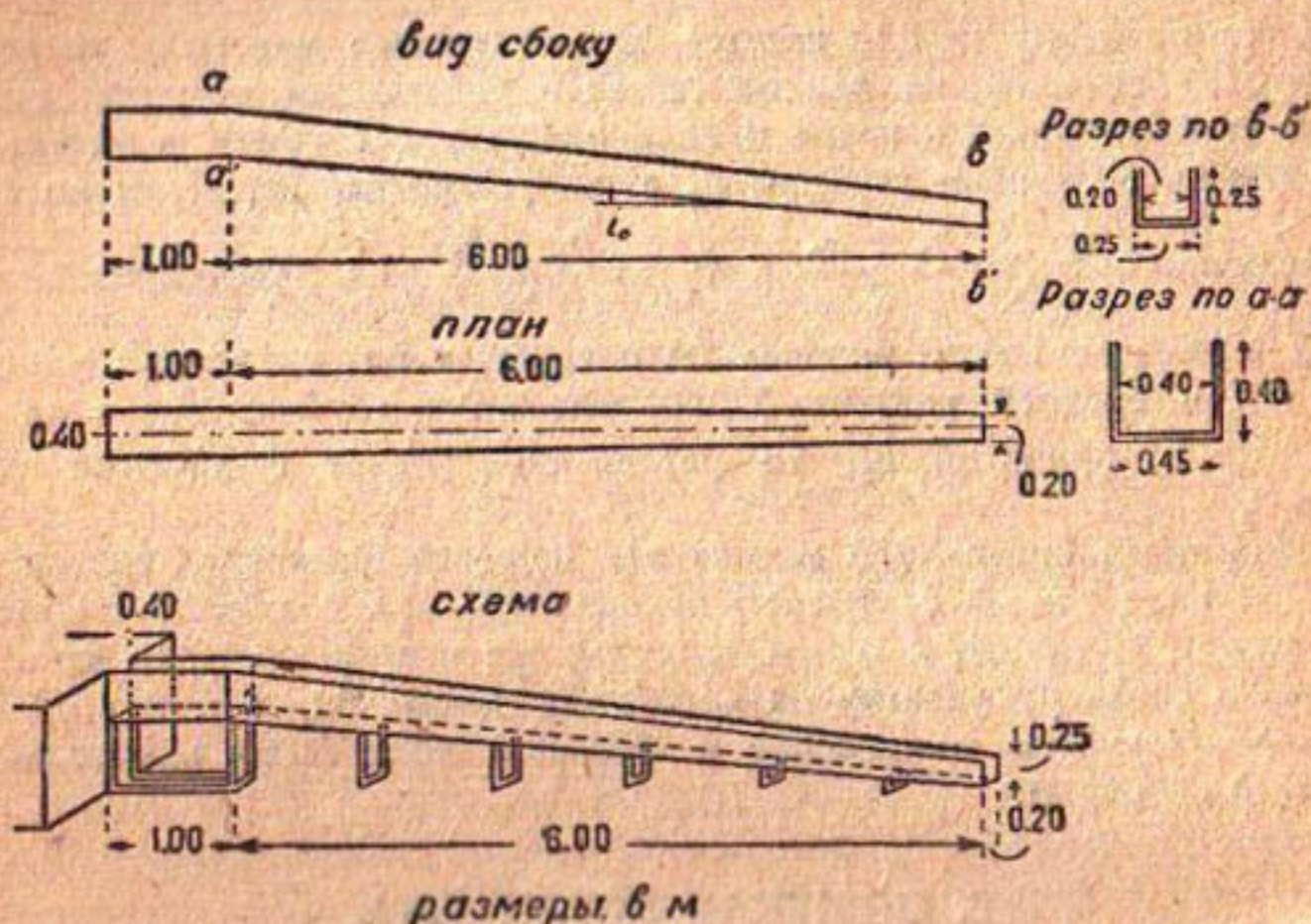


Рис. 3.

3. ПРОИЗВОДСТВО ОПЫТОВ.

Опыты по исследованию быстротока переменной ширины проводились в следующем порядке и нижеследующими приборами.

В опытный лоток пускался расход воды открытием задвижки подводящей трубы бетонного лотка. Затем ждали минут 15—20, пока движение в опытной модели установится, после чего замерялся расход воды. Расход определялся мерным водосливом бетонного лотка, который был протарирован ранее объемным способом и Ребоковским водосливом с тонкой стенкой. Замер расхода воды производился в начале и в конце каждого опыта.

Напор в голове опытной установки и глубины в ней при различных расходах замерялись измерительными иглами (шпигмасштабами). Точность делений измерительных игл 0,1 мм. Измерительные иглы при замерах были укреплены на рейках с движками, которые можно передвигать вдоль лотка. Таким образом 4 иглами на лотке определялись глубины в 14 точках. Для устранения ошибок в измерениях глубин (при передвижке игл) нулевые отметки дна лотка определялись многократно. Напор в голове опытной установки замерялся жестко укрепленной иглой.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЛУБИН В БЫСТРОТОКЕ.

При протекании воды по быстротоку, как обычно, наблюдалась сильная рябь на поверхности воды в виде продольных бороздок. При входе в лоток и по всей длине его образовывалась интерференция этих борозд, особенно большая на подходном участке от бокового сжатия при входе. Кривые спада в начале опытного лотка были более крутыми, затем крутизна их уменьшалась, образовывался участок, примерно в середине лотка, с поверхностью, параллельной дну модели ($i_0 = i_{\text{поп}}$), потом он переходил в кривую подпора. На кривой спада в уравнении:

$$i = \frac{dy}{ds} = a \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{v^2}{C^2 R}$$

преобладающее влияние оказывает первый член правой части уравнения, на кривой подпора — второй член, что является следствием усиленной потери на трение из-за сужения сечения быстроготока.

Опыты, как указано выше, проводились для 3 уклонов быстроготока:

Серия 1 — $i_0 = 0,0990$,

Серия 2 — $i_0 = 0,0691$,

Серия 3 — $i_0 = 0,0374$.

Кривые свободных поверхностей, наблюдаемые при этом, даны на рисунках 4, 5, и 6.

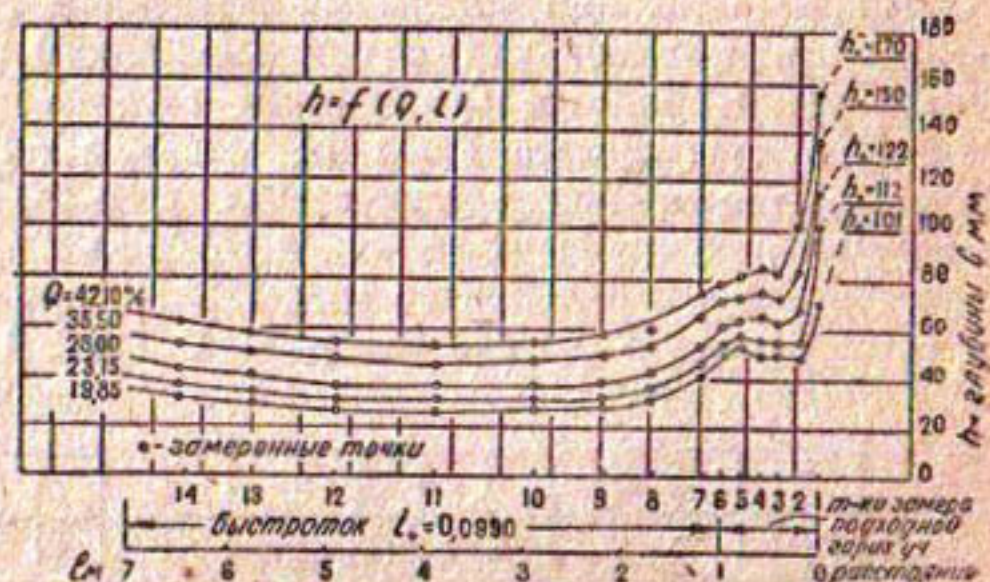


Рис. 4.

Они вычерчены для 1-й серии при расходах в лотке:

$$Q = 42,10; 35,50; 28,00; 23,15; 19,75 \text{ л/сек.}$$

Для 2-й серии при $Q = 39,80; 34,65; 30,25; 25,55; 20,50$ л/сек.

Для 3-й серии при $Q = 39,80; 35,50; 30,90; 25,00; 19,80$ л/сек.

На рис. 4, 5 и 6 по оси ординат отложены глубины в опытном лотке; справа горизонтальной чертой, соединенной пунктиром с кривой свободной поверхности, показаны напоры в голове опытной установки при соответствующем расходе.

По оси абсцисс внизу отложены справа налево расстояния от начала опытного лотка, считая от входа в него; несколько выше этой шкалы расстояний даны точки, в которых производились замеры. Для удобства изображения и проведения отсчетов при обработке глубины в лотке отложены от горизонтальной линии.

Из рассмотрения рис. 4, 5 и 6 видно, что при одинаковых сечениях лотка изменение уклона лотка влияет на характер свободных поверх-

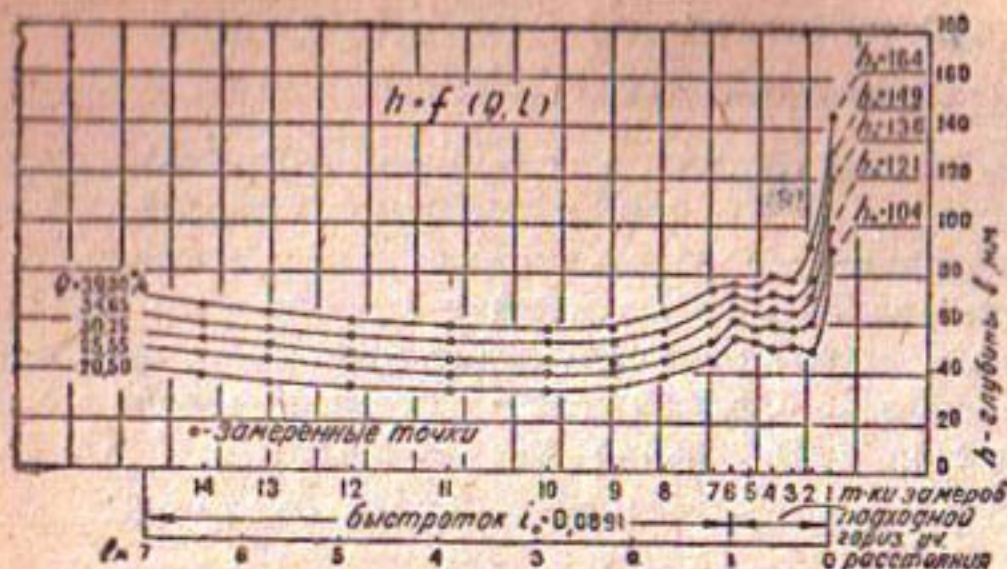


Рис. 5.

5. ГЛУБИНА В НАЧАЛЕ БЫСТРОТОКА.

При расчетах быстротоков как постоянной, так и переменной ширины всегда предполагают, что в конце широкого порога (в начале быстроготока) устанавливается критическая глубина. В действительности же, в большинстве случаев этого не наблюдается как в натуре на сооружениях, так и при исследованиях в лаборатории. В наших опытах также не получалось критической глубины в начале быстроготока (в конце горизонтального подводящего участка). По произведенным исследованиям в точке замера 6 (начало быстроготока) (рис. 4, 5 и 6) для всех расхо-

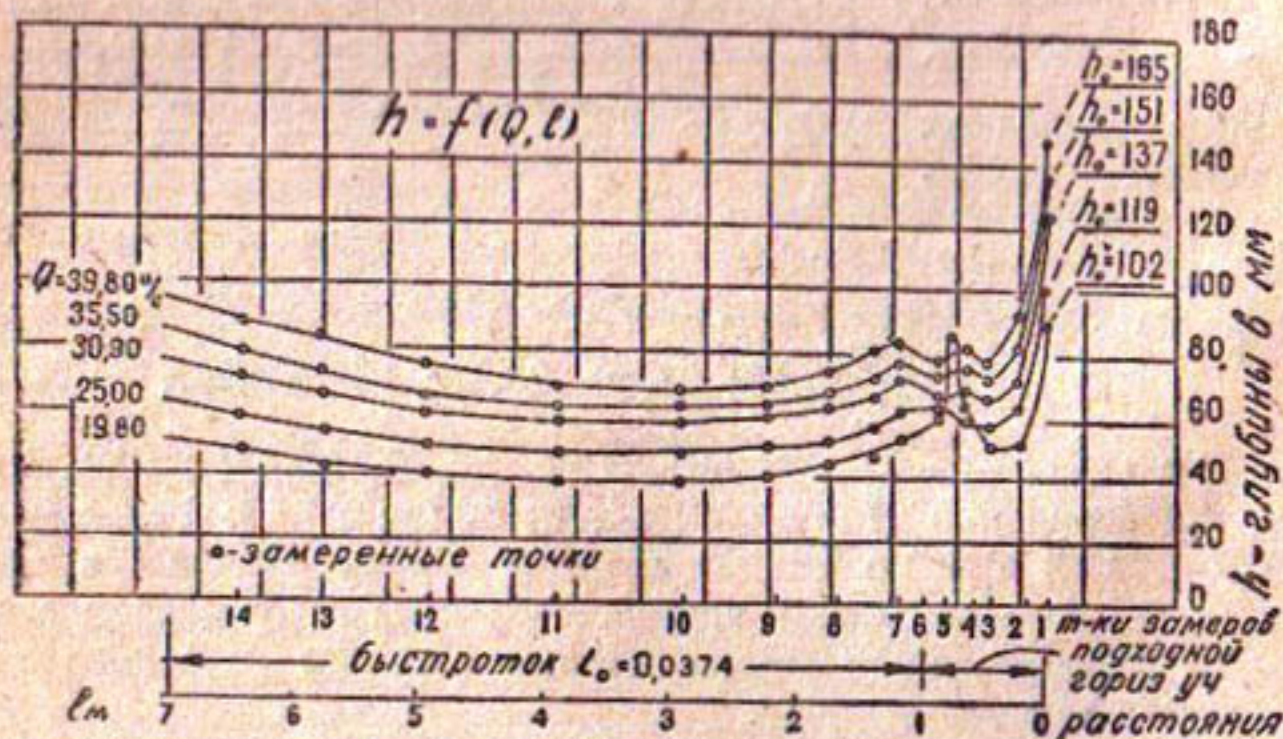


Рис. 6.

дов серий 1, 2, 3 имеем глубину в точке 6: $h_6 < h_k$, причем отношение колеблется в пределах 0,742 — 0,839. Глубина, соответствующая по величине при данном расходе критической глубине, устанавливается на крутой части кривой спада.

Длина участка, в конце которого устанавливается эта глубина, зависит от напора в голове быстротока при данном устройстве входа.

Вопрос о том, какая глубина будет устанавливаться в конце водослива с широким порогом в том или ином случае, несмотря на большое количество работ, проведенных в этом направлении как чисто теоретических, так и экспериментальных ¹⁾, до сего времени еще не разрешен. В данном случае, в быстротках дело осложняется еще тем, что вход воды на подходной участок к быстротоку (водослив с широким порогом) происходит из головы быстротка, с шириной во много раз большей, чем ширина канала. В нашем случае отношение ширины канала к ширине головы его было довольно велико: $\frac{b}{B} = \frac{0,40}{1,70} = 0,18$ (боковое сжа-

тие). Поэтому говорить об установлении критической глубины точно так же, как для водослива с широким порогом, поставленного в лотке с одинаковой шириной, может быть, не совсем верно. Вопрос о водосливах с широким порогом с боковым сжатием, насколько нам известно, еще никем не разбирался. Не ставился он и нами, так как не мог войти в работу по проверке методов расчетов быстротков переменной ширины. Для изучения протекания жидкости через водослив с широким порогом как без бокового сжатия, так и с боковым сжатием (до сего времени совершенно не изученного) необходимы специальные исследования. Здесь же мы отметим лишь наблюдаемое явление и еще раз указываем на необходимость его изучения.

6. ВЫБОР ФОРМУЛЫ ДЛЯ УЧЕТА ШЕРОХОВАТОСТИ.

В науке еще до сего времени не вполне ясно и совершенно установлено понятие шероховатости и связанных с ним величин. Вследствие этого и учет шероховатости приобретает характер условности. При наличии неравномерного движения потока дело усложняется еще тем, что предлагаемые формулы выводились на основе, главным образом, режима равномерного. Но отсутствие данных о шероховатости при неравномерном режиме все же заставляет обычно принимать и для неравномерного движения влияние шероховатости подобно тому, как это делается для движения равномерного.

Учет шероховатости дна и стенок каналов и труб для равномерного движения, как известно, может быть произведен по целому ряду фор-

¹⁾ Böss — Berechnung der Abflussmengen und der Wasserspiegellage bei Abstürzen und Schwellen unter besonderer Rücksichtigung und der dabei auftretenden Zusatzspannungen, *Wasserbau und Wasserwirtschaft*, № № 2, 3, 1929.

Григорovich Н. А. — Анализ движения жидкости через водослив с широким порогом, *Гидротехник*, № 1, 1929 — 1930 г.

Musterle — Abflussberechnung der Wehren mit breiten Krone mit Hilfe des Impulssatzes, *Wasserwirtschaft*, № 21, 1930.

Bakhmeteff B. A. and Curtis D. D. — Proceedings Am Soc. C. E., v 57, № 2, 1931 г.

Шварц А. И. — О движении потока через водослив с широким порогом, *Известия Научно-исследовательского института гидротехники*, № 1, 1931 г.

мул, которые, однако, дают наилучшие результаты только в определенных границах, как например формула Форхгеймера: $C = \frac{1}{n} R^0$ приложима, главным образом, для расчета больших каналов; формула Гангиле — Куттера:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i}}{1 + \left[23 + \frac{0,00155}{i} \right] \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

дает хорошие результаты для больших и средних каналов (земляных, бетонных) и естественных русел.

Формула Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y,$$

где для практических расчетов можно принимать $y = 1,5 \sqrt{n}$ (при гидравлических радиусах $R < 1$ м) и $y = 1,3 \sqrt{n}$ (при $R > 1$ м), была получена на основе изучения больших земляных и бетонных каналов и бетонных и железобетонных труб большого диаметра.

Для нашего случая, где гидравлические радиусы колеблются в пределах $R = 0,0267 - 0,0477$ м, вышеприведенные формулы, а также и ряд других, полученных на основе опытов не с каналами и трубами малых значений гидравлических радиусов, не могут быть применены из-за опасности получения больших ошибок.

Наиболее пригодными в данном случае являются:

1. Формула Ребока¹⁾:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i}}{1 + \left[23 + \frac{0,00155}{i} \right] \frac{n}{\sqrt{R + 0,03}}},$$

который видоизменил формулу Гангиле — Куттера введением поправки 0,03 к гидравлическому радиусу для пользования ею при малых гидравлических радиусах в пределах $R = 0,01 - 0,06$ м, т. е. тех, которые имеем и в наших опытах.

2. Формула Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{0,167},$$

¹⁾ Rehbock — Betrachtungen über Abfluss, Stau und Walzenbildung bei fließenden Gewässern, 1917 г., а также приводится в статье проф. Палкуева Я. А. — Механическое подобие в применении к испытанию моделей гидравлических сооружений в гидравлической лаборатории, Труды Института мелиорации и гидротехники, т. VII, 1932 г.

которая, как указывает Штриклер ¹⁾, основываясь на обработке многочисленных опытов различных экспериментаторов, дает хорошие результаты при гидравлических радиусах выше 0,03 — 0,04 м.

Акад. Павловский Н. Н. ²⁾ также замечает, что формула Маннинга очень близка и к его формуле для гладких труб небольшого диаметра. Показатель y , вычисленный по его формуле получается равным 0,14 — 0,16, т. е. почти совпадает со значением показателя y гидравлического радиуса по формуле Маннинга.

Для выбора той или другой формулы учета шероховатости при расчетах быстротоков переменной ширины в нашем случае нами были сделаны сравнительные подсчеты коэффициента C для различных величин гидравлических радиусов, полученных из опыта как по формуле Маннинга, так и по формуле Ребока. При вычислениях коэффициента C по Маннингу коэффициент шероховатости был принят нами $n = 0,0085$. Для вычисления по Ребоку коэффициент $n = 0,0085$ уже не годится, так как Ребок дает другие значения n по сравнению с значениями n по Гангиле — Куттеру и Маннингу. Для получения n по Ребоку нами был применен следующий прием пересчета. Из непосредственно полученных на опыте с быстротоком переменной ширины величин n были выбраны случаи, где получалось $n = 0,0085$, затем значения C по Маннингу приравнялись значению C по Ребоку:

$$C_m = \frac{1}{n_m} R^{0,167} = C_p = \frac{23 + \frac{1}{n_p} + \frac{0,00155}{i}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{i}\right) \frac{n_p}{\sqrt{R + 0,03}}},$$

где n_m обозначает коэффициент шероховатости в формуле Маннинга, n_p — в формуле Ребока.

Из полученного соотношения находим n_p . В среднем получилось, что $n_m = 0,0085$ соответствует $n_p = 0,0096$.

На основе полученных значений n делаем сравнение величин C по Маннингу и Ребоку для различных значений гидравлических радиусов, которые получились при опытах. Результаты подсчетов приводим в таблице 1.

Из приведенной таблицы видно, что разница в величинах, вычисленных по формулам Ребока и Маннинга очень невелика и колеблется в пределах 2,4—0% для гидравлических радиусов $R = 0,0267 — 0,0477$ м. Подобные ошибки при подсчетах на счетной линейке не окажут существенной разницы на определение искомых величин. На основании этого считаем возможным применение формулы Маннинга при дальнейших вычислениях, так как структура формулы и связанные с ней подсчеты во много раз проще, чем по формуле Ребока.

¹⁾ Strickler — Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, № 16, 1923.

²⁾ Акад. Павловский Н. Н. — О новой расчетной формуле для равномерного движения, Труды Первого всесоюзного гидротехнического совещания, 1929 г.

Сравнения коэффициентов C , вычисленных по Маннингу и Ребоку

№№	R_m	C_m	C_p	ΔC %	П р и м е ч а н и е
1	0,0257	64,25	65,80	2,4	R — гидравлический радиус. C — коэффициент, учитывающий шероховатость. Индекс m показывает, что вычисление C производилось по Маннингу: $C_m = \frac{1}{n_m} R^{0.167}.$ Индекс p по Ребоку: $C_p = \frac{23 + \frac{1}{n_p} + \frac{0,00155}{i}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{i}\right) \frac{n_p}{\sqrt{\kappa + 0,03}}}$ Коэффициент шероховатости $n_m = 0,0085,$ $n_p = 0,0096,$ ΔC — разница C_m и C_p в процентах.
2	0,0278	64,70	66,20	2,4	
3	0,0286	65,00	66,30	2,0	
4	0,0310	65,90	67,00	1,6	
5	0,0367	67,60	68,40	1,0	
6	0,0387	68,35	68,80	0,5	
7	0,0392	68,50	69,10	0,8	
8	0,0394	68,60	68,20	0,6	
9	0,0410	69,00	69,40	0,5	
10	0,0412	69,20	69,50	0,4	
11	0,0429	69,60	69,80	0,3	
12	0,0435	70,00	69,70	0,4	
13	0,0441	70,15	70,00	0,2	
14	0,0457	70,22	70,40	0,3	
15	0,0477	70,75	70,75	0,0	

7. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ ПОДСЧЕТАМИ.

Сравнение результатов опытов по определению кривой свободной поверхности в быстротоке производилось с кривыми, вычисленными по методам акад. Павловского, инж. Хестедта, инж. Мосткова и инж. Крицкого. При определении глубин потока по методу акад. Павловского применялось уравнение Бахметева:

$$\frac{i_0 l}{h_0} = \eta_{l2} - \eta_{l1} - \left(1 - \frac{a C^2 i_0 B}{g \chi}\right) [B(\eta_{l2}) - B(\eta_{l1})],$$

решение которого возможно при помощи таблиц, зная величину гидравлического показателя русла:

$$x = \frac{2 \lg \left(\frac{K_1}{K_2} \right)}{\lg \left(\frac{h_1}{h_2} \right)},$$

где $K_1 = C_1 \omega_1 \sqrt{R_1}$ — модуль расхода русла при глубине наполнения h_1 , K_2 — соответственно при глубине h_2 . Значение показателя русла было определено нами на основании проведенных опытов в пределах наполнения при минимальном и максимальном расходе в 5 точках по длине лотка для каждой серии опытов. Определение показателя русла из соотношения любых глубин и модулей расхода может повлечь за собой ошибку

в выборе величины x , что ясно из исследований, проведенных инж. Чугаевым¹⁾.

Во избежание этого, значения x вычислены на основе опытных данных, они колебались в пределах величин 2,96 до 3,05 для отдельных точек по длине быстротока. При подсчетах кривых свободных поверхностей по ур-нию Бахметева нами принято $x = 3$.

Для производства вычислений по ур-нию Бахметева необходимо еще знать значение величин коэффициентов C , учитывающих шероховатость быстротока, и коэффициентов неравномерности распределения скоростей. Коэффициент C определялся нами по ф-ле Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{0,167}$$

где брался коэффициент шероховатости $n = 0,0085$. Коэффициент неравномерности был принят равным $\alpha = 1$.

Глубины потока в начале быстротока принимались равными критическим:

$$h_k = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{b}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}}$$

при заданном расходе, как это обычно делается, согласно существующей теории о глубине в конце водослива с широким порогом.

Вычисления глубин потока, сделанные по методам Хестеда, Мосткова и Крицкого, проводились при тех же значениях коэффициента шероховатости $n = 0,0085$ в формуле:

$$C = \frac{1}{n} R^{0,167}$$

и коэффициенте неравномерности $\alpha = 1$, что и при вычислениях по методу Павловского.

Результаты вычислений для расхода $Q = 35,50$ л/сек при уклоне быстротока $i_0 = 0,0990$ по всем перечисленным методам даны в таблице 2.

Из приведенной таблицы 2 видно, что наибольшее расхождение с опытными данными имеем при вычислениях по методу Мосткова. Методы Хестеда и Крицкого показали совпадающие результаты между собой и очень близкие к опытным данным, несколько превышающие последние. Глубины, подсчитанные по методу Павловского, дали также хорошее совпадение с опытами, имея несколько преувеличенные значения на кривой спада и преуменьшенные на кривой подпора.

При дальнейших подсчетах метод инж. Мосткова был исключен как дающий большие расхождения с опытными измерениями, хотя и идущими в запас прочности при расчетах быстротока.

¹⁾ Некоторые вопросы неравномерного движения воды в открытых призматических руслах, Известия Научно-исследовательского института гидро-техники, № 1, 1931 г.

Таблица 2

Глубины в лотке

№№ точек	Q м³/сек	b _м	По замерам		По Павловскому		По Хестеду		По Мосткову		По Крицкому	
			h _м	q ₀	h _м	Δ q ₀	h _м	Δ q ₀	h _м	Δ q ₀	h _м	Δ q ₀
В		0,385	0,0552	100	0,0576	+4,5	—	—	0,0570	+3,3	—	—
Г		0,350	0,0472	100	0,0492	+4,2	0,0480	+1,7	0,0520	+10,2	0,0485	+2,7
Д		0,300	0,0453	100	0,0458	+1,4	0,0470	+3,5	0,0500	+10,2	0,0466	+2,5
Ж		0,250	0,0486	100	0,0479	+1,5	0,0500	+2,8	0,0510	+4,8	0,0500	+2,8
З		0,200	0,0565	100	0,0547	+3,3	0,0580	+2,6	0,0515	+9,5	0,0580	+2,6

Примечание. Q — расход воды в лотке м³/сек,
h — глубина в лотке в м,
Δ q₀ — разница в процентах.

Таблица 3

Глубины в лотке

№№ точек	Q м³/сек	b _м	h _м — глубины				Примечание	
			по опытной кривой h	по Хестеду		по Крицкому		
				принято	получено	принято		получено
Б	0,03025	0,390	0,0599	0,0620	0,0620	0,0630	Q — расход воды в лотке в м³/сек, b — ширина лотка в м, h — глубина в м, „принято“, „получено“ обозначает принятые величины h при решении уравнения подбором и результирующее значе- ние его.	
В		0,385	0,0535	0,0560	0,0560	0,0570		
Г		0,350	0,0466	0,0480	0,0480	0,0490		
Д		0,300	0,0460	0,0470	0,0470	0,0480		
Ж		0,250	0,0491	0,0510	0,0510	0,0480		
З		0,200	0,0564	0,0590	0,0590	0,0600		

Методы Хестеда и Крицкого были сравнены еще для других случаев. Приводим в таблице 3 пример такого подсчета для расхода $Q = 30,25$ л/сек при уклоне быстротока $i_0 = 0,0691$. Из этой таблицы видно, что получающиеся результаты совпадают.

В дальнейшем метод Крицкого нами был также исключен, несмотря на хорошие результаты, из-за длительности решения задачи о нахождении глубин этим методом (он очень удобен для отыскания критического уклона $i_{кр}$).

Все следующие вычисления проделаны нами лишь по методам акад. Павловского и Хестеда. Произведенные вычисления глубин даны в таблицах 4, 5, 6 и рисунках 7—15. При уклоне быстротока $i_0 = 0,0990$ расходы взяты:

$Q = 42,10; 35,50;$
 $23,15$ л/сек;

при уклоне $i_0 = 0,0691$:
 $Q = 39,80; 30,25;$
 $20,50$ л/сек;

при уклоне $i_0 = 0,0374$:
 $Q = 39,80; 30,90;$
 $19,80$ л/сек.

Из рассмотрения приведенных рисунков видно, что в условиях проведения опытов как

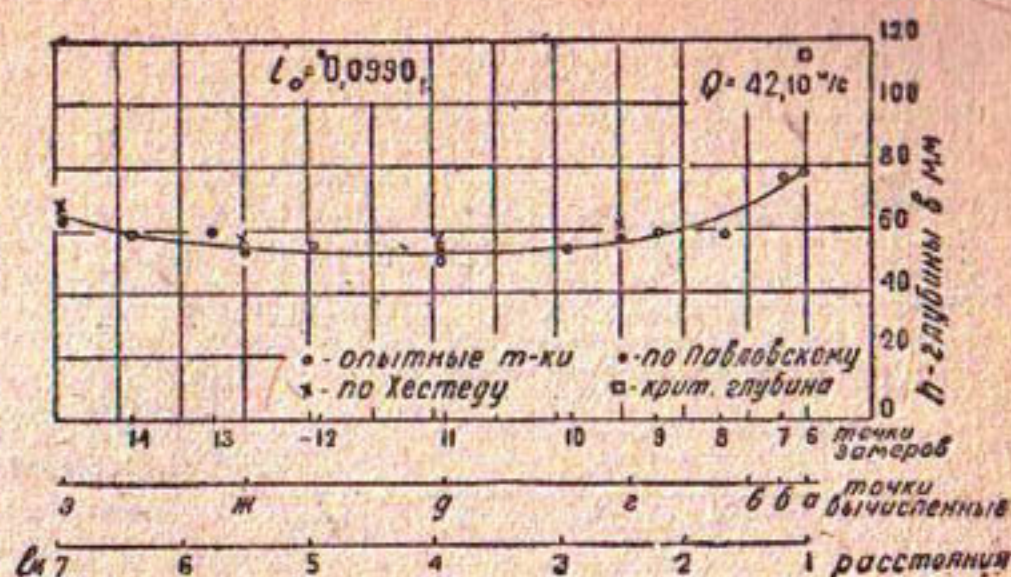


Рис. 7.

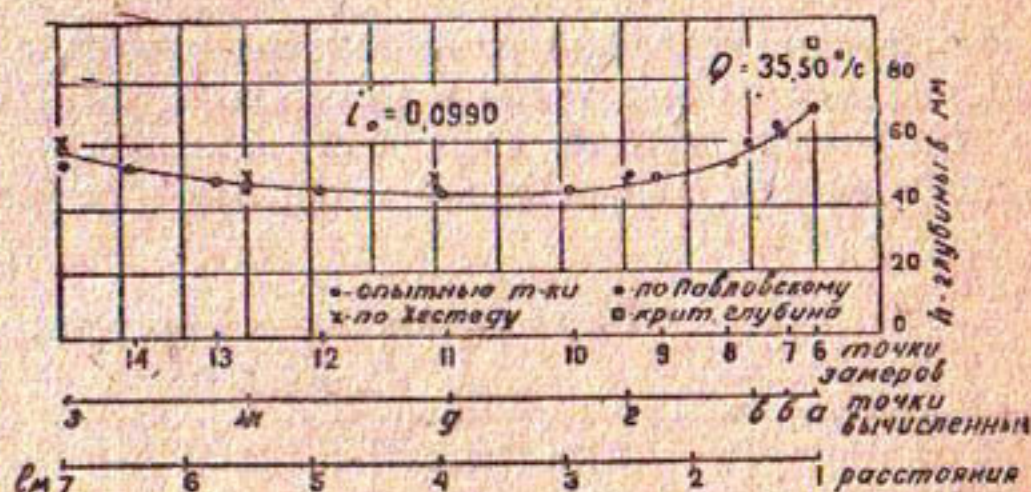


Рис. 8.



Рис. 9.

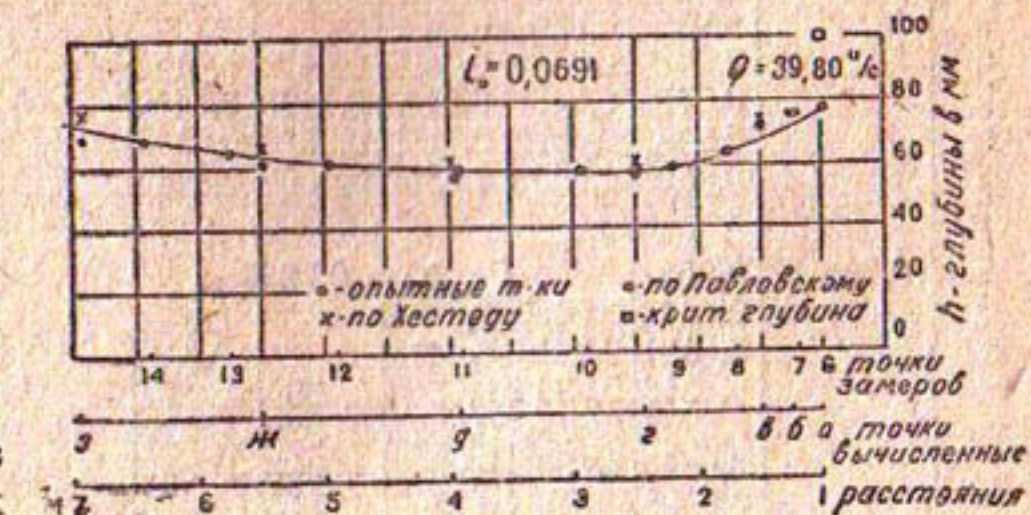


Рис. 10.



Рис. 11.

метод акад. Павловского, так и метод Хестеда показали результаты, близкие к опытным данным. Точки, вычисленные по методу акад. Павловского, на кривой спада почти все лежат выше опытной кривой, т. е. дают запас в вычислении глубин.

На кривой подпора точки ложатся несколько ниже опытной кривой, причем расхождения тем больше, чем меньше уклон и чем больше пропускаемый расход.

На участке кривой свободной поверхности, где уклон ее i равен уклону лотка i_0 , вычисленные точки лежат на опытной кривой. Вычис-

Глубины в лотке—серия 1-я
 $i_0 = 0,0990$

Таблица 4

№№ точек	Q м³/сек	h _м замер.	По Павловскому		По Хестеду		Примечание
			при- нято	полу- чено	при- нято	полу- чено	
а б в г д ж з	0,04210	0,0775	$h_k = 0,1043$ м				Q — замеренный расход в лотке в м³/сек, h — глубина в м, h_k — критические глубины в м,
		0,0720	0,0740	0,0755	0,0760	0,0760	
		0,0670	0,0684	0,0674	0,0675	0,0675	
		0,0553	0,0560	0,0558	0,0570	0,0570	
		0,0520	0,0530	0,0526	0,0550	0,0550	
		0,0552	0,0560	0,0549	0,0580	0,0580	
		0,0650	0,0630	0,0623	0,0670	0,0670	
а б в г д ж з	0,03550	0,0704	$h_k = 0,0929$ м				„принято“, „получено“ означает то же, что и в таблице 3.
		0,0610	0,0660	0,0668			
		0,0555	0,0580	0,0576			
		0,0470	0,0480	0,0492	0,0480	0,0480	
		0,0450	0,0470	0,0458	0,0470	0,0470	
		0,0487	0,0485	0,0479	0,0500	0,0500	
		0,0567	0,0560	0,0547	0,0580	0,0580	
а б в г д ж з	0,02315	0,0537	$h_k = 0,0699$ м				
		0,0443	0,0430	0,0485			
		0,0391	0,0410	0,0418			
		0,0315	0,0330	0,0340	0,0330	0,0330	
		0,0305	0,0330	0,0324	0,0320	0,0320	
		0,0320	0,0340	0,0340	0,0350	0,0350	
		0,0398	0,0400	0,0389	0,0410	0,0410	

Глубины в лотке — серия 2-я

$$i_0 = 0,0691$$

№№ точек	Q м³/сек	h _к замер.	По Павлов- скому		По Хестеду		П р и м е ч а н и е
			при- нято	полу- чено	при- нято	полу- чено	
а б в г д ж з	0,03980	0,0783	h _к = 0,1007 м				Обозначения те же, что в таблице 4.
		0,0700	0,0740	0,0738	0,0800	0,0800	
		0,0656	0,0690	0,0695	0,0700	0,0700	
		0,0 90	0,0590	0,0592	0,0660	0,0600	
		0,0690	0,0570	0,0508	0,0590	0,0590	
		0,0620	0,0610	0,0596	0,0640	0,0640	
		0,0721	0,0690	0,0681	0,0760	0,0760	
а б в г д ж з	0,03025	0,0672	h _к = 0,0835 м				
		0,0590	0,0625	0,0637	0,0620	0,0620	
		0,0534	0,0575	0,0560	0,0560	0,0560	
		0,0467	0,0450	0,0462	0,0481	0,0480	
		0,0460	0,0450	0,0445	0,0470	0,0470	
		0,0431	0,0485	0,0477	0,0510	0,0510	
		0,0564	0,0560	0,0548	0,0590	0,0590	
а б в г д ж з	0,02050	0,0534	h _к = 0,0644 м				
		0,0470	0,0460	0,0471			
		0,0425	0,0420	0,0426	0,0400	0,0400	
		0,0330	0,0355	0,0345	0,0340	0,0340	
		0,0320	0,0340	0,0332	0,0340	0,0340	
		0,0351	0,0360	0,0350	0,0370	0,0370	
		0,0391	0,0400	0,0403	0,0430	0,0430	

ления, произведенные по Хестеду, дали почти все несколько преувеличенные значения и тем больше, чем меньше уклон.

Заметим, что в начале быстотока на кривой спада получаем по опытным данным значения глубин преуменьшенными по сравнению с вычисленными различными способами.

Подобное явление объясняется принятием в последнем случае в начале быстотока критической глубины h_k , которая при всех наших опытах была больше действительно установившейся глубины (см. выше).



Рис. 12.

Глубины в лотке—серия 3-я

$$i_0 = 0,0374$$

№№ точек	Q м³/сек	h _{из} замер.	По Павлов- скому		По Хестеду		П р и м е ч а н и е
			при- нято	полу- чено	при- нято	полу- чено	
а	0,03980	0,0826	$h_k = 0,1007$ м				Обозначения те же, что в таблице 4.
б		0,0773	0,0815	0,0816	0,0840	0,0840	
в		0,0741	0,0728	0,0740	0,0800	0,0800	
г		0,0693	0,0700	0,0686	0,0730	0,0730	
д		0,0702	0,0680	0,0679	0,0750	0,0750	
ж		0,0793	0,0730	0,0736	0,0820	0,0820	
з		0,0960	0,0840	0,0837	0,0990	0,0990	
а	0,03090	0,0705	$h_k = 0,0847$ м				
б		0,0655	0,0680	0,0682	0,0700	0,0700	
в		0,0628	0,0609	0,0630	0,0660	0,0660	
г		0,0570	0,0900	0,0567	0,0590	0,0590	
д		0,0570	0,8029	0,0558	0,0600	0,0600	
ж		0,0620	0,0557	0,0595	0,0660	0,0660	
з		0,0760	0,0012	0,0686	0,0790	0,0790	
а	0,01980	0,0526	$h_k = 0,0630$ м				
б		0,0471	0,0490	0,0497	0,0490	0,0490	
в		0,0440	0,0461	0,0462	0,0460	0,0460	
г		0,0384	0,0395	0,0402	0,0410	0,0410	
д		0,0390	0,0390	0,0394	0,0420	0,0420	
ж		0,0422	0,0425	0,0421	0,0450	0,0450	
з		0,0471	0,0480	0,0484	0,0540	0,0540	

Для распространения полученных результатов в опытной установке на любые быстротоки необходимо подтверждение их на лотках иной шероватости и формы (расширяющихся). Кроме опытов в лаборатории желательно также проведение исследований на существующих сооружениях подобно тому, как это было

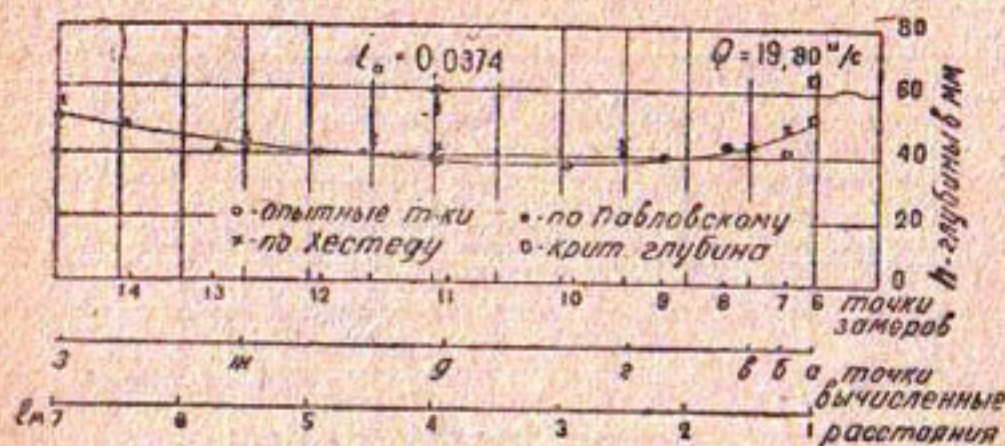


Рис. 13.

(см. Отчет об исследовательских работах, проведенных на строительстве Гизельдонской ГЭС в 1931—33 гг. 6. Гидротехгеоинститутом). В этом случае теоретические подсчеты кривой свободной поверхности в быст-

роток по методу Хестеда и замеры в натуре дали хорошее совпадение результатов.

8. ВЫВОДЫ.

На основе проведенных исследований в лаборатории и теоретических подсчетов можно сделать следующие выводы:

1. Расчеты быстротоків переменной ширины, произведенные по методам акад. Павловского, инж. Хестеда и инж. Крицкого, дают близкие совпадения с величинами, полученными в условиях данных опытов; метод инж. Мосткова дает преувеличенные значения глубин.

2. Для перенесения результатов опытов на другие случаи быстротоків необходимо подтверждение выводов на лотках иной шероховатости, формы и масштаба, а также и на исследованиях быстротоків в натуре.



Рис. 14.



Рис. 15.

А. А. Ничипорович.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОТОКА ЭРИВАНСКОЙ ГИДРОСТАНЦИИ.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

СССР обращается в великую промышленную страну, где все ее население занимается производительным трудом. Но чтобы производственные ее возможности не застывали в неподвижных формах, нужны постоянные исследования и изыскания новых, более совершенных форм.

Исследование, произведенное секцией исследований гидростанций б. Всесоюзного института гидротехники и гидрогеологии, с инж. А. А. Ничипоровичем во главе выездной партии, и настоящий труд последнего представляют собой увязку полевой, лабораторной и кабинетной работы по одному из злободневных вопросов гидротехнического строительства — расчету быстротоков, этого дешевого и надежного типа водосбросов для лишней временами воды в оросительных системах и водяных силовых установках.

Здесь счастливо и удачно увязались и производственные задания с насущной потребностью гидротехнического строительства вообще в постановке этой задачи, и наши полевые исследования с аналогичными заграничными лабораторными.

Выводы данной работы дают уже возможность практического их применения в проектировке быстротоков, дальнейшие полевые наблюдения и лабораторные исследования должны уточнить параметры и коэффициенты, предлагаемые автором настоящего исследования.

Дирекция Института „Водгео“.

I. ВВЕДЕНИЕ.

Весной 1930 г. гидросектором Государственного института сооружений (вошедшим в 1931 г. в состав Всесоюзного института гидротехники и гидрогеологии) было получено предложение от строительства Гизельдонской гидростанции дать свои соображения по запроектированному им водосбросу на расход в $90 \text{ м}^3/\text{сек}$ с падением в 50 м на основе лабораторной проверки его, а также и на основе исследования работаю-

шего уже несколько лет крупнейшего в Союзе быстротока Эриванской гидростанции. Это предложение было вызвано отсутствием как в нашей, так и в иностранной литературе достаточных данных для точного гидравлического расчета подобных сооружений.

Гидросектор принял на себя это предложение, поручив лабораторную проверку запроектированного лотка проф. Н. Н. Павловскому, а испытание Эриванского быстротока — своей секции исследований гидростанций.

В мае 1930 г. особой партией в составе инж. Чугаева, инж. Хакимова и техника Муравьева, а также при участии инж. Чикноверова, под руководством автора настоящей статьи было проведено исследование Эриванского быстротока по программе и примерной методике, составленной при участии проф. Н. Н. Павловского и инж. Н. М. Щапова — заведующего секцией. Указанное исследование должно было установить коэффициент шероховатости и насыщения воды воздухом данного быстротока, выяснить возможность применения обычных формул гидравлики к течению воды со скоростями больше критических, выяснить зависимость насыщения воды воздухом от гидравлических элементов быстротока и, наконец, осветить вопрос о размываемости дна быстротока при больших скоростях за известный период его эксплуатации.

По причинам новизны такого рода исследований, отсутствия методики, ограниченности времени на подготовку и на производство самого исследования и пр. нельзя было требовать от данной работы исчерпывающих ответов на все затронутые вопросы, но тем не менее следует признать, что полученные результаты оказались достаточно интересными, освещая ряд вопросов, важных как для частного случая (Гизельдонского водосброса), так и для проектирования подобных сооружений вообще.

Ввиду того что общее направление, а отчасти и методика настоящих исследований зависели в сильной степени как от расположения и конструкции отдельных сооружений Эриванской гидростанции, так и от условий ее работы в целом, дадим ниже краткое ее описание.

2. ОПИСАНИЕ ЭРИВАНСКОЙ ГИДРОСТАНЦИИ.

Эриванская гидростанция, строительство которой началось в октябре 1923 г. и закончилось в мае 1926 г., расположена в 2 км от города Эривани на р. Занге.

Схема указанной станции такова: в 5 км выше по р. Занге от здания станции расположено головное сооружение, при помощи которого вода из р. Занги забирается в деривационный канал, идущий по левому берегу реки (рис. 1 и 2). В конце канала имеется напорный бассейн, из которого вода по железным напорным трубопроводам подается к зданию станции, где расположены горизонтальные турбины Френсиса; дальше вода по отводному каналу отводится опять в р. Зангу (рис. 3 — см. в конце книги).

Средний минимальный расход р. Занги по данным гидрометрии за 9 лет (1912—1917) для места расположения станции равен $15,4 \text{ м}^3/\text{сек}$,

расчетный же расход станции равен $12 \text{ м}^3/\text{сек}$; следовательно, полный расход за очень редким исключением обеспечен круглый год.

Забор воды в деривационный канал осуществляется при помощи раздельной дамбы из каменной наброски ряжевого типа длиной 100 м. В конце указанной дамбы имеются 1 промывной шлюз и 1 приемный, состоящие из 3 деревянных щитов с механизмом для ручного привода¹⁾.



Рис. 1. Головное сооружение.



Рис. 2. Деривационный канал.

За головным сооружением идет деривационный канал, в качестве которого был использован существующий оросительный канал им. т. Шаумяна без существенных его изменений, несмотря на его большие уклоны (от 0,0028 до 0,005) и вызываемые тем самым большие потери напора.

Канал проходит по левому склону скалистого ущелья р. Занги. Правый борт канала образован подпорной стенкой бутовой кладки из базальта на цементном растворе с внутренней отвесной гранью. Левый борт с нагорной стороны образован поверхностью скалы, облицованной базальтовым камнем с половинным откосом. Дно канала бетонное, состава 1:3:6, коэффициент шероховатости принят 0,17. Канал рассчитан на пропуск $11,5 \text{ м}^3/\text{сек}$. Живое сечение его меняется от 4 до 6 м^2 , а скорость от 1,5 до $3 \text{ м}/\text{сек}$.

Ввиду допущенных больших скоростей и возможности попадания в него крупных наносов, канал по всей длине имеет пять промывных шлюзов с порогами для очистки от донных наносов.

Деривационный канал заканчивается напорным бассейном, откуда вода поступает через трубопровод в турбины (рис. 4). Так как вода

¹⁾ Указанные сооружения предполагается заменить в ближайшее же время постоянной плотиной водосливного типа с промывными шлюзами.

по каналу подходит к бассейну со скоростью около 2 м/сек и несет значительное количество наносов, то напорный бассейн служит одновременно и отстойником; он выполнен по типу осадочного бассейна непрерывного действия Штернагеля. Ширина бассейна равна 8 м , длина 53 м при глубине воды в начале бассейна $8,5 \text{ м}$ и в конце $3,5 \text{ м}$ (рис. 5).

Взвешенные частицы наносов, отлагаясь по наклонному дну в более глубокой части бассейна, промываются при помощи специального грязеспуска и сбрасываются в боковой канал, а затем по водосбросу в р. Зангу. Для предотвращения попадания в бассейн и в трубопроводы плавающих тел перед бассейном имеется грубая решетка, а перед напорным и трубопроводными — мелкая. Очистка решеток производится



Рис. 4. Напорный и отстойный бассейн.

особыми скребками вручную. Скорость воды в бассейне при максимальной нагрузке станции $0,5 \text{ м/сек}$.

Для поддержания постоянного рабочего уровня в бассейне имеется боковой водослив шириной 20 м . Он способен пропустить расход свыше $10 \text{ м}^3/\text{сек}$ при толщине переливающегося слоя не более $0,45 \text{ м}$. Переливающаяся через водослив вода (рис. 6 и 7) попадает по особому водоводу в водосброс, а затем в р. Зангу. Часть воды в количестве $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$, предназначенная для орошения, помощью специального затвора отделяется от канала перед входом в бассейн и отводится вокруг бассейна по особому каналу, который переходит дальше в оросительный канал им. Шаумяна.

Перед входом в напорный бассейн с правой стороны деривационного канала имеются щитовые отверстия (рис. 8), через которые можно сбрасывать воду по быстротоку (водосбросу) в р. Зангу.

Быстроток, исполненный по проекту инж. В. В. Панова, служит как для сброса воды из деривационного канала, так и из напорного бассейна через боковой водослив и грязевик, а в зимнее время также шуги

и льда в р. Зангу. Он представляет собой канал прямоугольного сечения с переменным уклоном (уменьшающимся сверху вниз) от 50 до 1,7‰ с некоторым увеличением уклона на середине его длины. Общая длина

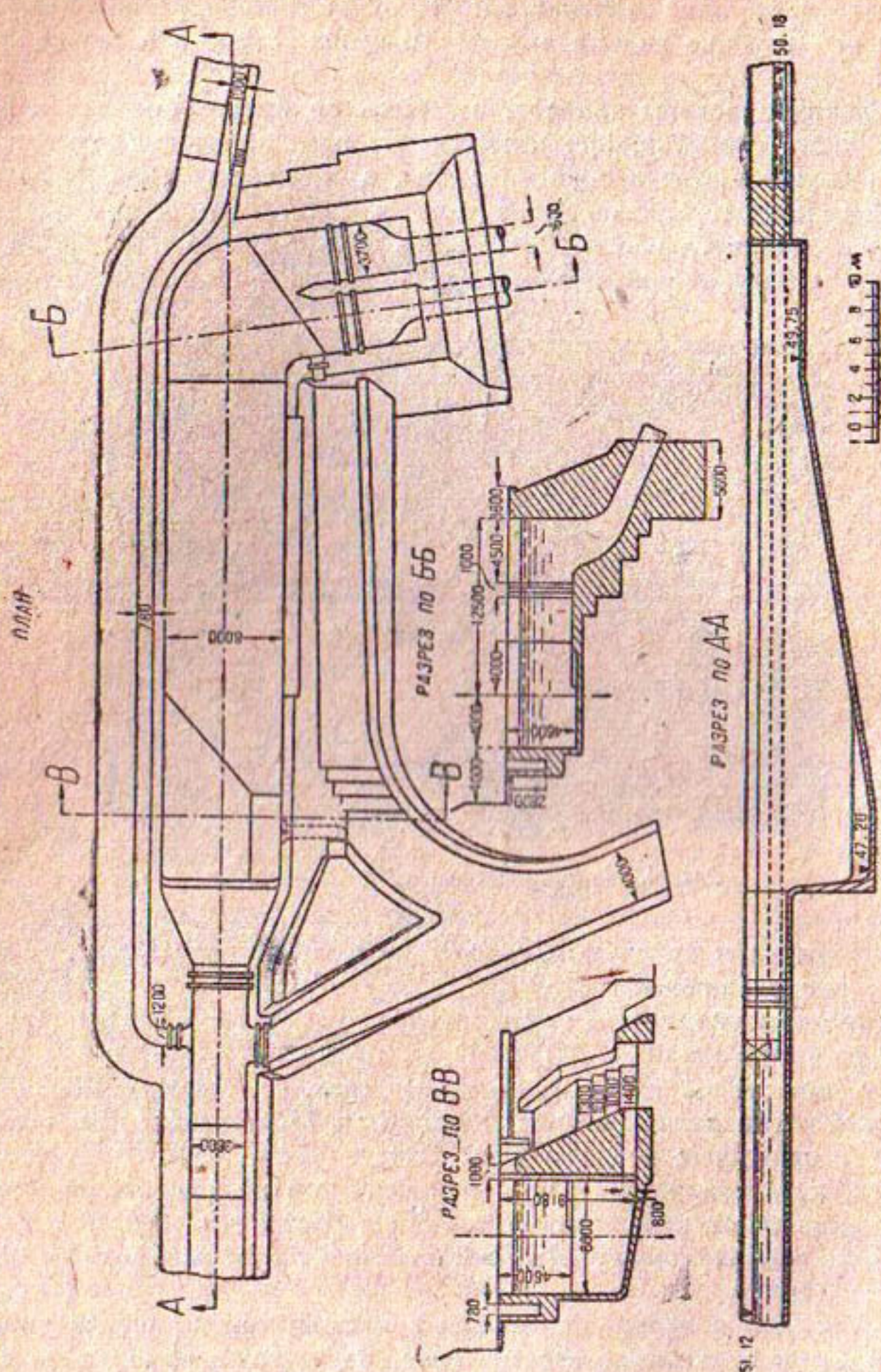


Рис. 5. План и разрезы напорного бассейна.

быстротока 150 м, падение 48 м, средний уклон 32‰ (рис. 9 — см. в конце книги). Дно и стенки быстротока выполнены из базальтовой бутовой кладки толщиной 0,5 м на цементном растворе 1:3. При этом поверх-

...ть камней намеренно, для сохранения шероховатости, подвергнута
... грубой обработке (рис. 10).

Ширина быстротока в большей своей части равна 4 м, и лишь в на-
...де его имеется сужение до 2,5 м, а в конце расширение до 7 м
(рис. 11).

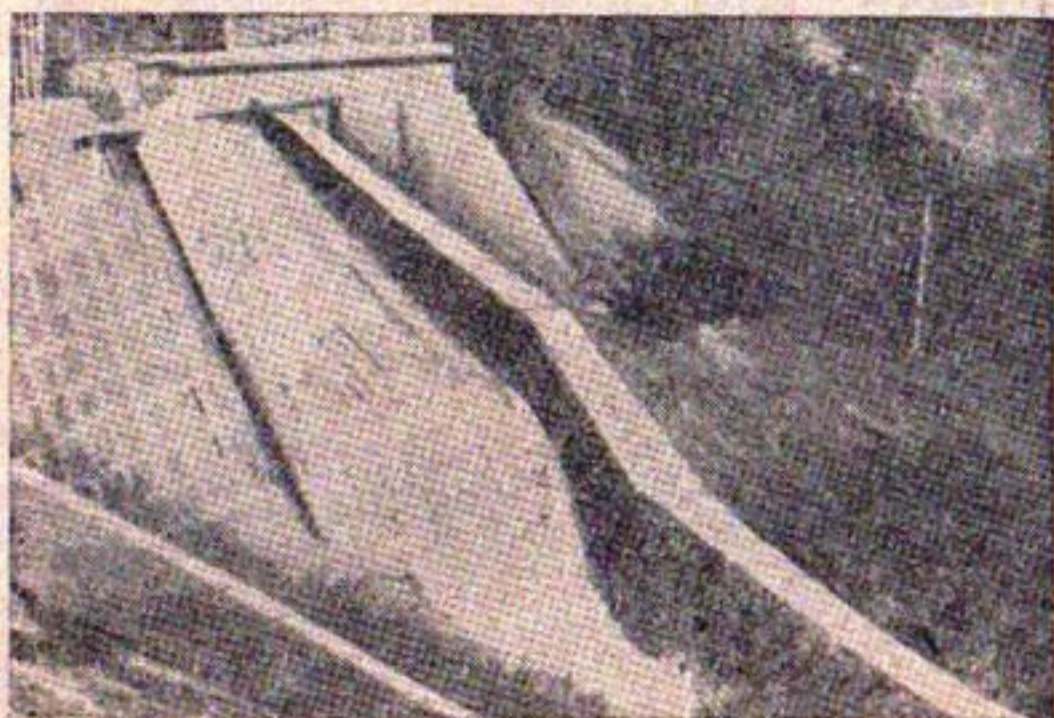


Рис. 6. Сброс излишней воды через боковой водослив.

В начальной своей части быстроток в плане несколько не симметри-
чен, вследствие чего в этой части происходит значительный сбив струи,
и только на значительном расстоянии ниже происходит полное растека-
ние воды по всей ширине лотка (рис. 12).

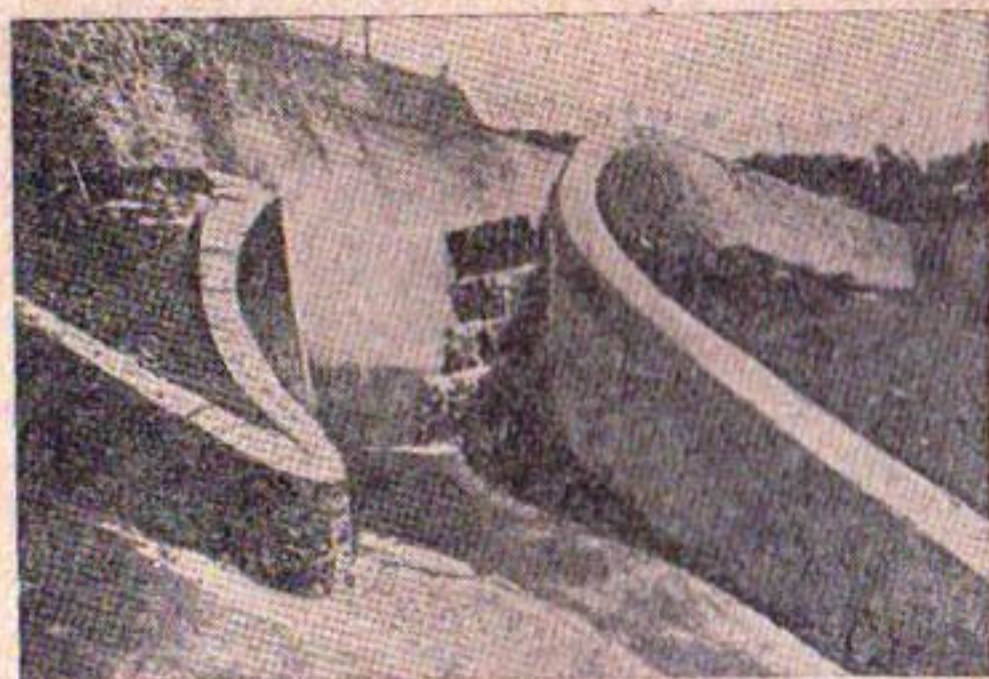


Рис. 7. Боковой канал, отводящий воду в быстроток
из грязеспуска и из напорного бассейна.

С левой стороны, в начальной его части, к быстротоку примыкает
короткий криволинейный канал шириной также 4 м, по которому в не-
го сбрасывается вода из напорного бассейна грязеспуска (рис. 7).

В конечной своей части быстроток заканчивается бетонным массивом, углубленным на значительную глубину в грунт. Этот массив имеет выступ, который воспринимает удар падающей струи (рис. 13 и 14), предохраняя тем самым нижнюю часть от подмыва.

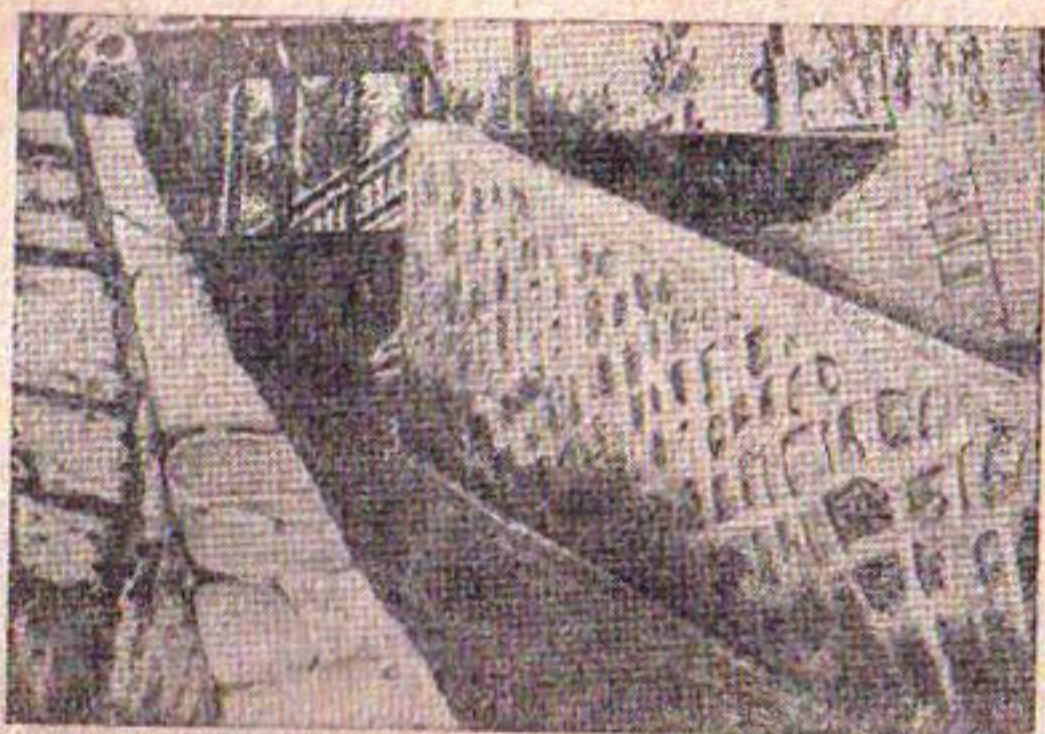


Рис. 8. Головная часть быстротока.

В первое время концевая часть быстротока была осуществлена без указанного бетонного массива, и в первый же год эксплуатации, вследствие сильного размыва, в ней появились значительные трещины.



Рис. 10. Дно и стенки быстротока.

Расчетная пропускная способность быстротока $10 \text{ м}^3/\text{сек}$. В эксплуатации он находится с 1926 г., причем сброс по нему происходит почти непрерывно при расходах от 1,5 до $2,0 \text{ м}^3/\text{сек}$. Большие расходы по нему сбрасываются очень редко и кратковременно.

Вода из напорного бассейна попадает в две камеры, отделенные от него тремя металлическими щитами каждая (рис. 4). В нижнюю часть фронтальной стены обеих камер вделаны два железных напорных трубопровода (рис. 15). Первый из них, 1-й очереди, клепаный, на фланцевых соединениях с резиновыми прокладками, диаметром 1,6 м, длиной 133 м, снабжен 1 компенсатором, в конечной своей части имеет два ответвления для непосредственного соединения с двумя турбинами. Второй, 2-й очереди, сварной, диаметром 1,9 м, длиной 134 м, с 2 компенсаторами и 2 ответвлениями.

Котельное железо на обоих трубопроводах переменной толщины от 7 мм вверху до 12 мм внизу. Оба трубопровода проложены в открытой выемке по косогору на опорных подушках из каменной кладки (рис. 16). Вода из напорных трубопроводов поступает в горизонтальные турбины системы Френсиса, находящиеся в машинном зале здания станции.

Здание станции каменное, трехэтажное, площадью 45×15 м. В нем расположены в 1-м этаже — машинное отделение, дежурная комната, камера магнитных регуляторов, мастерская; во 2-м этаже — распределительное устройство и в 3-м — выход воздушных фидеров (рис. 17,

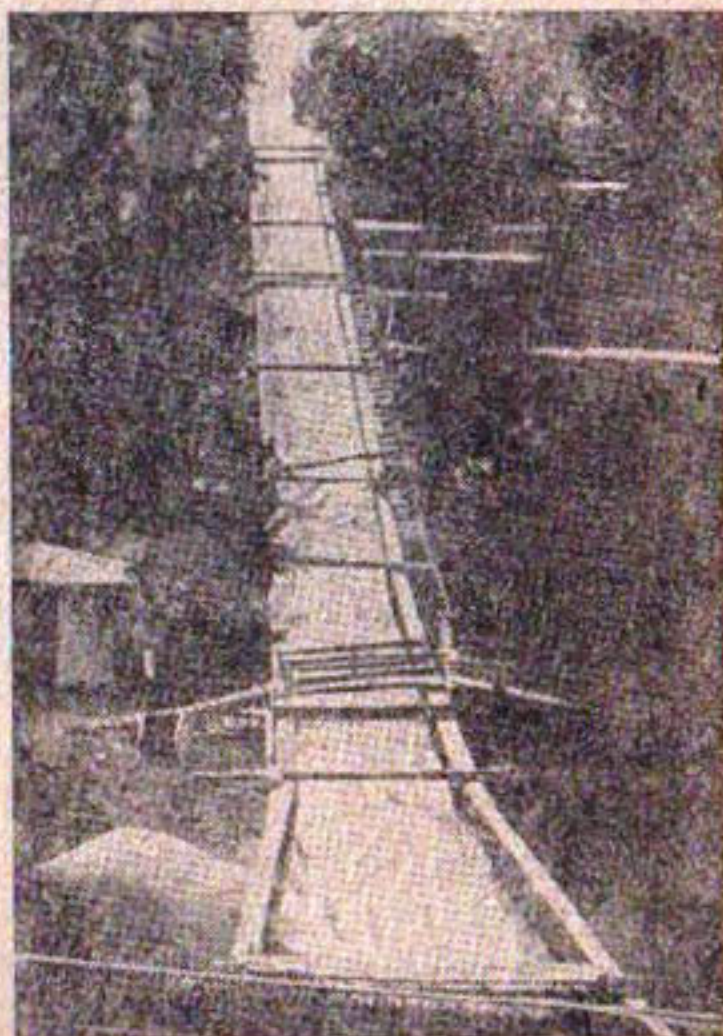


Рис. 11. Общий вид быстротока.



Рис. 12. Быстроток: вид сверху вниз.

18 — см. в конце книги). Из турбины вода поступает в отводный канал длиной 150 м, шириной 8 м, с боковыми стенками из сухой каменной кладки (рис. 19). От реки канал отделяется стенкой из базальта



Рис. 13. Конечная часть быстротока (быстроток не работает).

товой кладки на цементном растворе. В машинном зале расположены четыре закрытых спиральных турбины Френсиса (рис. 20) общей мощностью в 6800 л. с., установленных в две очереди. Две турбины 1-й очереди и их автоматические регуляторы изготовлены германским за



Рис. 14. Конечная часть быстротока (быстроток в работе).

водом Фриц Неймайер; они имеют при напоре 52,5 м, при расходе по 3 м³/сек, при 600 об/мин по 1400 л. с. Две турбины 2-й очереди того же типа изготовлены Ленинградским металлическим заводом; при напоре нетто 52,5 м и при расходе по 3,75 м³/сек они дают по 2000 л. с. Все турбины имеют наклонные к вертикали конические железные всасы

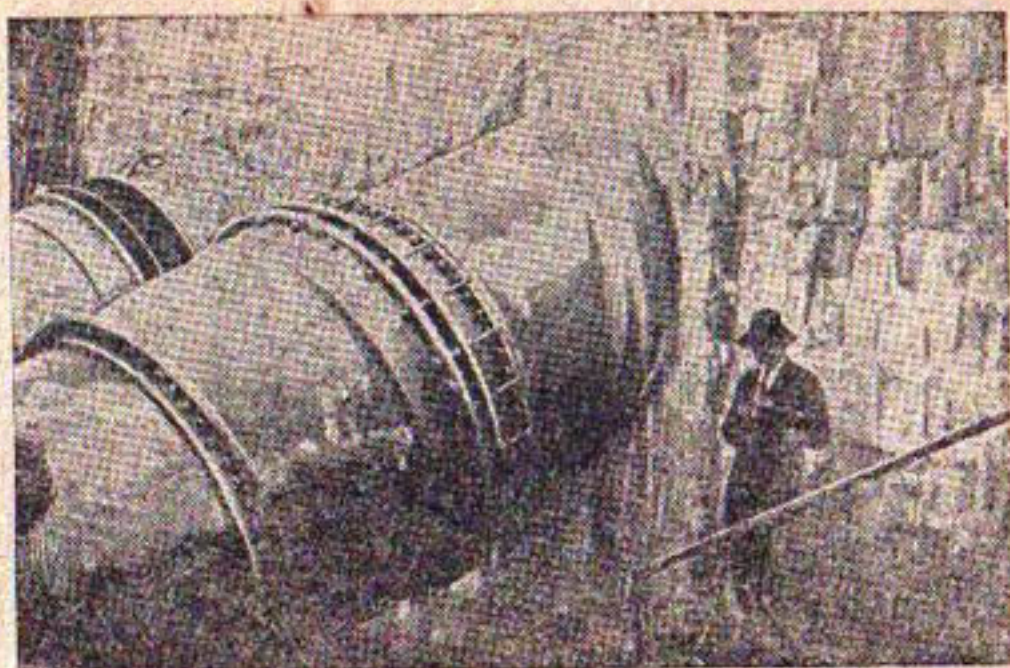


Рис. 15. Компенсаторы металлического трубопровода.

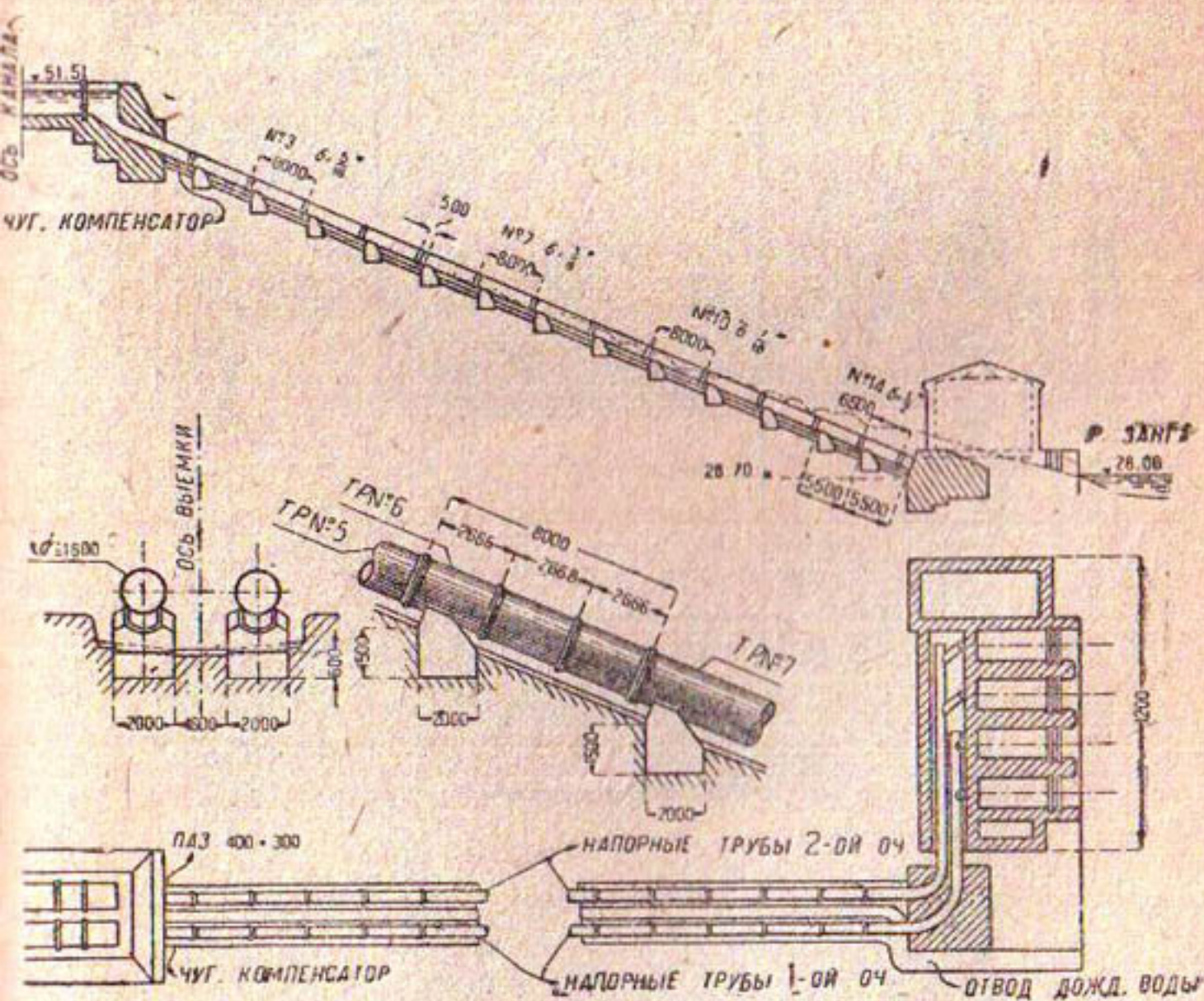


Рис. 16. Разрез по оси и план напорного трубопровода.

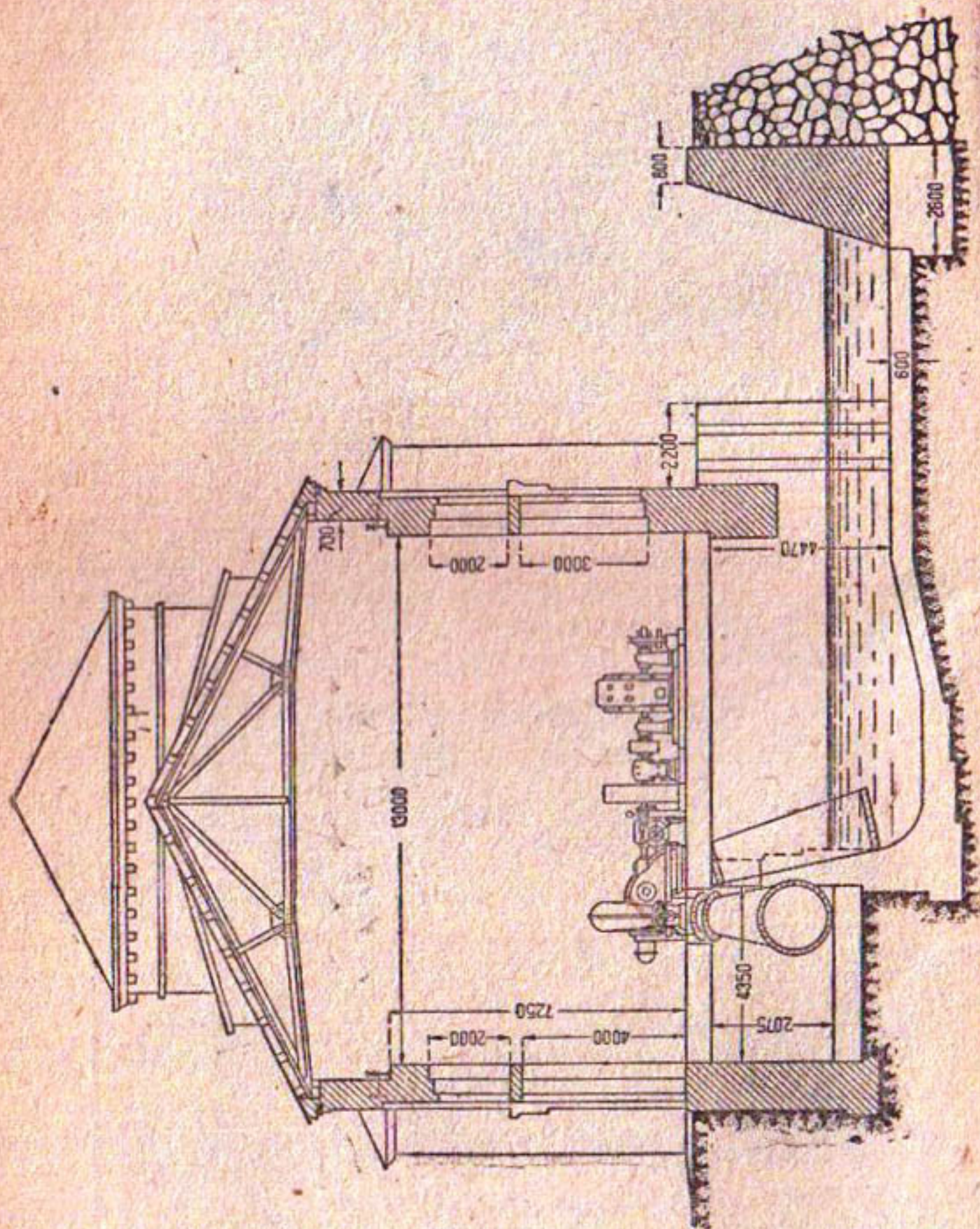


Рис. 17. Разрез здания станции.

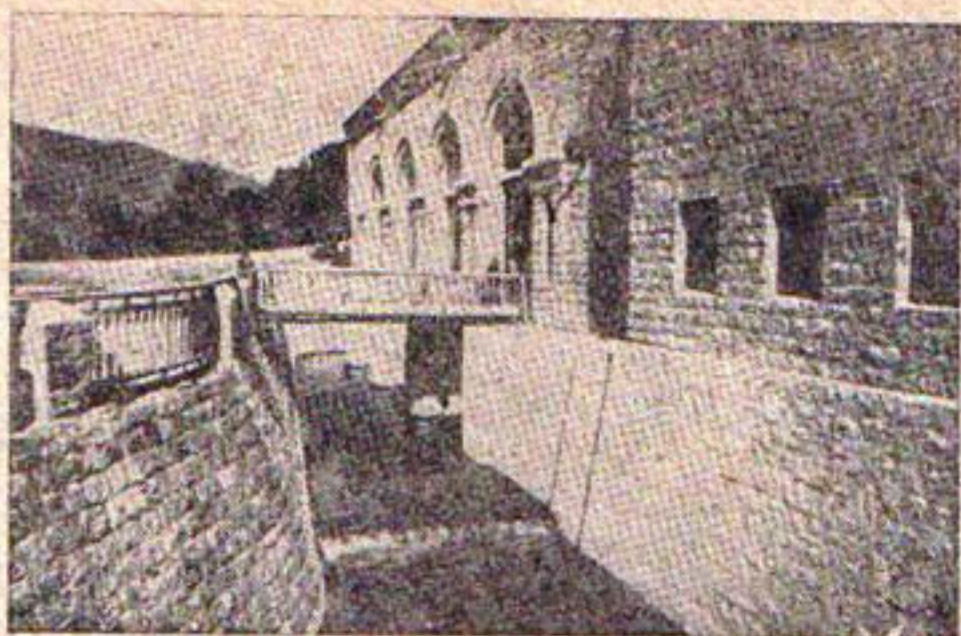


Рис. 19. Отводной канал.

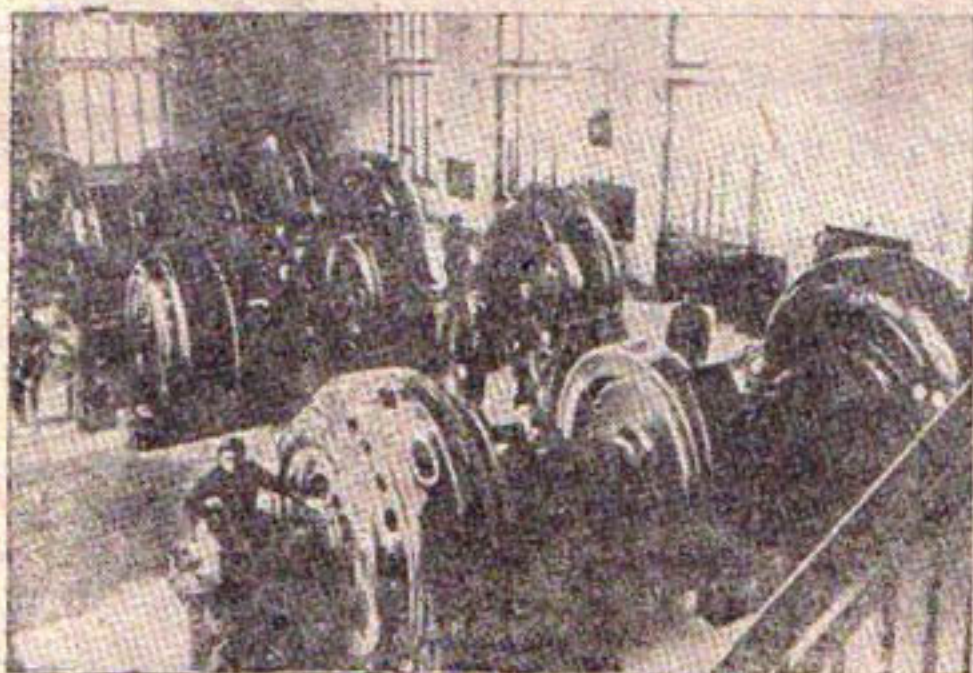


Рис. 20. Машинный зал.

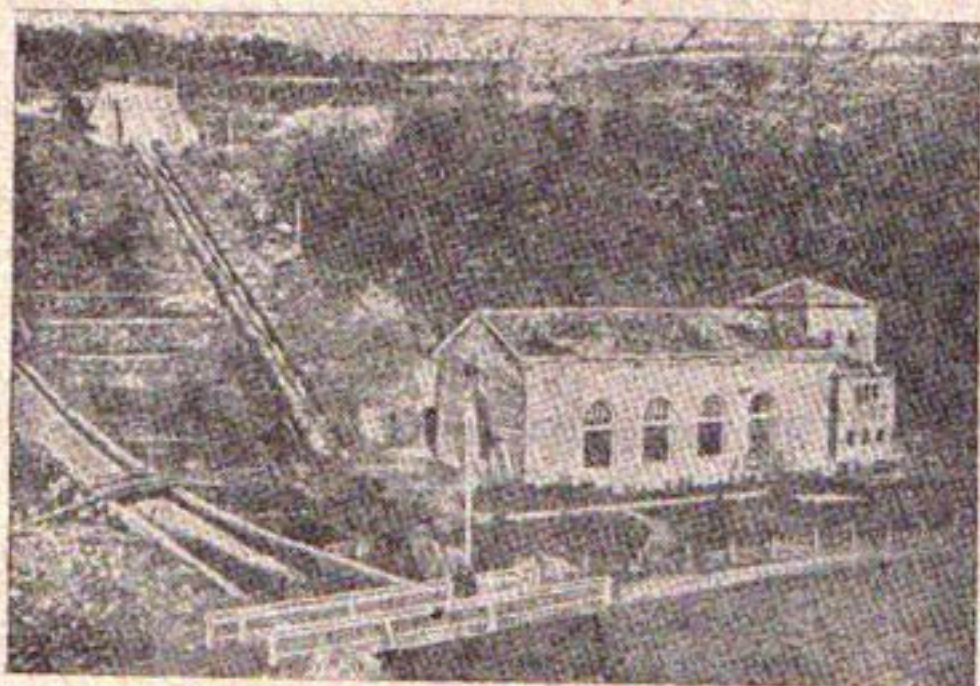


Рис. 21. Общий вид Эриванской ГЭС.

вающие трубы. Высота всасывания равна 4,5 м. Перед каждой турбиной на ответвлении трубопровода имеется по дроссельному клапану.

Все турбины при помощи упругих муфт соединены с генераторами трехфазного тока. Генераторы 1-й очереди — мощностью около 1100 кВт при 6600 В и 600 об/мин. Генераторы 2-й очереди — по 1750 кВт при 6600 В и 600 об/мин. Все генераторы как 1-й, так и 2-й очереди, а также все распределительное устройство для станции трансформаторных подстанций — изделия Харьковского электромеханического завода ГЭТ.

К. п. д. генераторов по заводским испытаниям при $\cos \varphi = 1$ в процентах таковы:

	При нагрузках		
	1/1	3/4	1/2
Для генераторов 1-й очереди	94,5	92,5	91,0
Для генераторов 2-й очереди	96,83	96,45	95,43

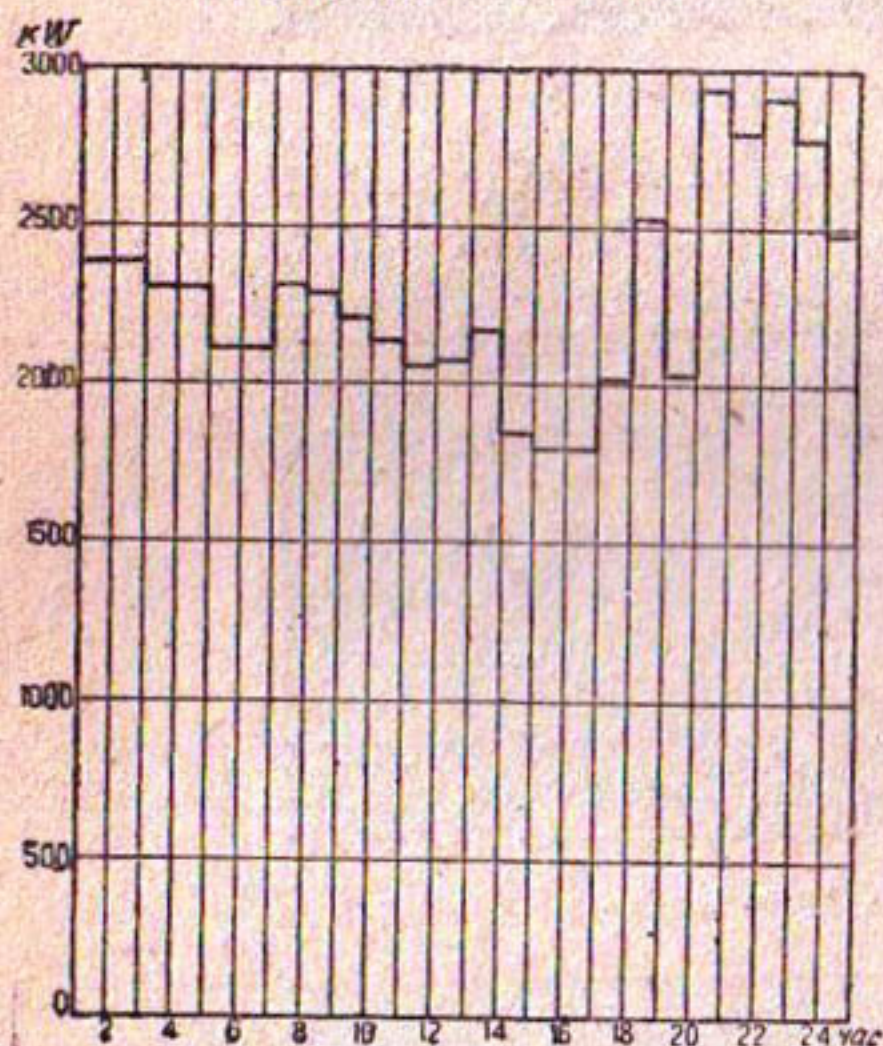


Рис. 22. График нагрузки Эриванской ГЭС.

Для турбин обеих очередей перед пусками их в эксплуатацию определялся к. п. д., причем для турбин 1-й очереди получились к. п. д.:

при нагрузках	1/1	3/4	1/2
	82,5	85	79,0%

а для турбин 2-й очереди:

при нагрузках	1/1	3/4	1/2
	85,0	80,0	76,0%

Для последних турбин были гарантированы к. п. д. при тех же нагрузках соответственно, 78,0, 76,5, 72,0%.

При испытаниях турбин 1-й очереди расход определялся в деривационном канале, а турбин 2-й очереди — вертушкой в трубопроводе, которая была укреплена на штанге в сальниках и устанавливалась в 9 точках по одному диаметру.

Все эти испытания производились, как сказано, при приемке турбин и без участия секции исследования гидростанций.

От генераторов ток подводится кабелем к распределительному устройству через масляные автоматические выключатели на шины 6600 В. От шин отходят фидера также через автоматические масляники в город, фабрично-заводский район и на повышающую подстанцию с 6600 на 22 000 В, расположенную отдельно от генераторного здания (рис. 21).

Основные потребители Эриванской гидростанции таковы: карбидный завод, маслозавод, хлопкоочистительный завод, насосная станция, мелкие промышленные и световые потребители.

Станция пущена в эксплуатацию в мае 1926 г. с оборудованием 1-й очереди на мощность 1760 kW и в июле 1929 г. на полную мощность 4560 kW. Рост нагрузки и себестоимость 1 kWh видна ниже:

	Максим. нагрузка kW	Средняя нагрузка kW	Выработка в год млн. kWh	Себестоим. коп. kWh
1926/27 г.	1 600	732	6,0	2,93
1927/28 г.	1 800	1 090	9,5	1,95
1928/29 г.	2 000	1 520	13,3	1,62
1929/30 г.	4 300	2 150	18,5	1,50

При полной нагрузке станция может выработать до 35 млн. kWh в год. На рис. 22 изображен суточный график нагрузки станции в мае 1930 г. Стоимость отдельных сооружений и станций в целом дана в таблице 1.

Таблица 1

Стоимость сооружений гидростанции

Наименование сооружений	С т о и м о с т ь			В с е г о
	строитель- ные работы	внутреннее оборудова- ние	заграничное оборудова- ние	
Головное сооружение	46 000	—	—	46 000
Деривац. канал	479 000	—	—	479 000
Напорный бассейн	191 000	—	—	191 000
Оросит. ветки	18 000	—	—	18 000
Генерат. здание	292 000	—	—	292 000
Трубопровод	84 000	156 000	—	240 000
Эл.-мех. оборудование	—	410 000	70 000	480 000
Водосброс	31 000	—	—	31 000
Отводные каналы	42 010	—	—	42 100
Подъездные пути и мосты . . .	—	—	—	—
И т о г о	1 183 000	566 000	70 000	1 819 000

Стоимость установленного 1 kW мощности станции при полном законченном оборудовании получилась равной 400 руб.¹⁾.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОТОКА.

Для выяснения всех необходимых данных по быстротоку необходимо было:

1. Сделать точный промер и нивелировку и наметить участки и створы для производства в них необходимых замеров.

¹⁾ Более краткие описания при отчасти отличных цифрах см. Тер-Минасян и В. Панов — Эриванская гидроэлектрическая станция, Известия Государственного электротехнического треста, № 1/2, 1927 г. и Ф. П. Товстолеся — Гидросиловое оборудование гидроэлектрических станций, 1931 г., стр. 177.

2. Пропустить и достаточно точно замерить несколько расходов воды по быстротоку с одновременным замером глубин воды, скоростей по отдельным вертикалям в различных сечениях и поверхностных скоростей на отдельных участках по всей длине быстротока.

3. Определить в различных сечениях прямым или косвенным путем насыщение воды воздухом, так как при работе быстротока можно было наблюдать (рис. 23) течение сплошной белой пены — смеси воды с воздухом — по всей его длине за исключением концевой его части, где при малых расходах, а следовательно, и при меньших скоростях наблюдалось уменьшение этого насыщения, а при некоторых расходах и полное его уничтожение.

Работа по промерам и нивелировке быстротока была проведена достаточно точно. Отметки дна брались в 3 точках по ширине и через

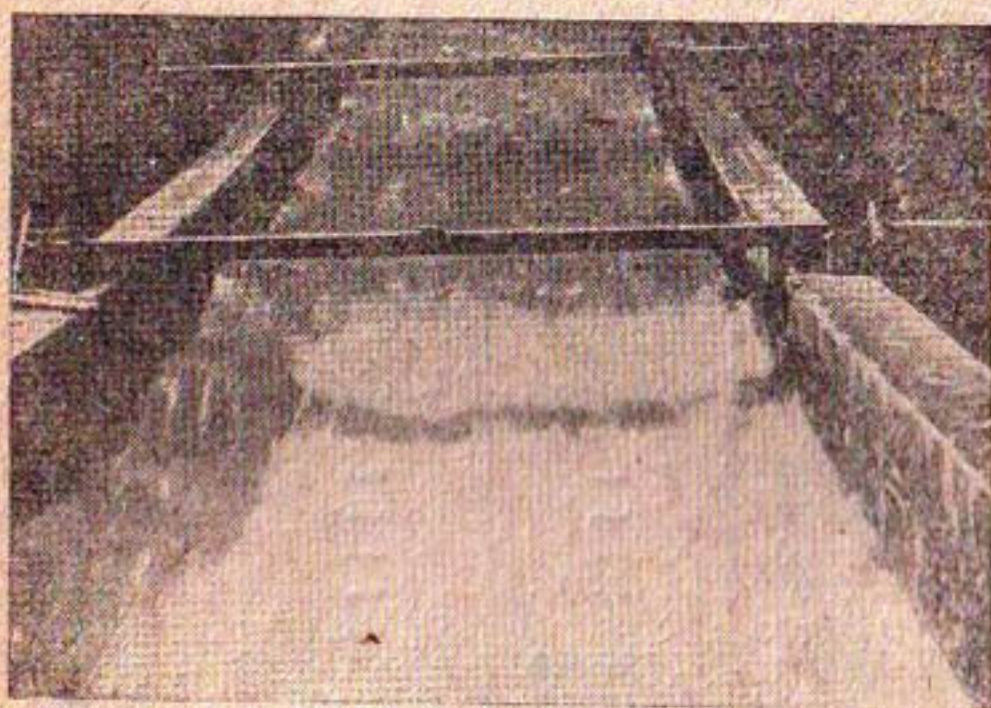


Рис. 23. Участок быстротока между створами 8—9 при пропуске расхода $6,18 \text{ м}^3/\text{сек}$.

3 м по его длине, а также во всех характерных точках (перелом, сужение, расширение и пр.). По обработке этих материалов получилась довольно пестрая картина уклонов дна, которое, как оказалось, не имело резко выраженных участков с одинаковыми уклонами. Для установления створов и участков для промеров и для облегчения всех последующих рассуждений необходимо было объединить участки с при-

мерно одинаковыми уклонами; при таком упрощении весь профиль дна быстротока разбился на 8 участков с постепенно уменьшающимся (сверху вниз) уклоном от 0,523 для 1-го участка, до 0,0172 для последнего участка, с некоторым повышением уклона на участке 4-м (рис. 9 — см. в конце книги).

В соответствии с полученным профилем были намечены створы для замера скоростей и глубин; по возможности в начале и в конце выбранных участков, а на длинных участках кроме того и в середине. Всего было намечено 12 створов. Каждый створ был оборудован простым мостиком. Результаты промеров помещены ниже в таблице 2, в первых ее четырех столбцах (номера створа, длина участка между основными створами l , уклон на участке I по тангенсу наклона и ширина сечения в створе b).

Для производства всех следующих измерений решено было пропустить через быстроток минимальный, средний и максимальный (расчетный) расходы. Но для пропуска $Q_{\text{макс}} = 10 \text{ м}^3/\text{сек}$ пришлось бы останавливать всю станцию, выключая всех абонентов, и весь расход деривацион-

ного канала сбрасывать через быстроток, что сделать по местным условиям не представлялось возможным. При этом расхода в $10 \text{ м}^3/\text{сек}$ нельзя было получить из-за недостаточной пропускной способности канала, которая оказалась равной всего лишь $9,30 \text{ м}^3/\text{сек}$. По указанным причинам от пропуска расчетного расхода пришлось отказаться и ограничиться максимальным возможным, равным $6,18 \text{ м}^3/\text{сек}$; расход этот был получен путем временного выключения карбидного завода и прекращения отпуска воды на орошение садов в окрестностях Эривани. Из-за такого стеснения потребителей все испытание при данном расходе пришлось сократить (до 30 минут), что отразилось на точности полученных результатов данного опыта.

При данном расположении головы быстротока по отношению к остальным сооружениям гидростанции непосредственное измерение расхода воды, поступающего в быстроток, с достаточной точностью произвести было невозможно, а поэтому решено было определить этот расход косвенным путем. При двух первых опытах (малые расходы) оказалось возможным замеренные так расходы сравнить с расходами, замеренными довольно грубо в самом быстротоке. Был избран следующий косвенный метод.

Расход в деривационном канале Q_d при работе гидростанции и быстротока и при пропуске воды на орошение можно выразить как сумму следующих расходов: Q_1 — расхода через быстроток, Q_m — расхода через турбины и Q_n — расхода в ирригационный канал, т. е.

$$Q_d = Q_1 + Q_m + Q_n$$

и при закрытом ирригационном канале, т. е. при $Q_n = 0$:

$$Q_d = Q_1 + Q_m.$$

В первом случае расход по быстротоку будет равен:

$$Q_1 = Q_d - (Q_m + Q_n),$$

а во втором

$$Q_1 = Q_d - Q_m.$$

Итак для определения необходимо было знать расходы Q_1 , Q_m и Q_n ; расходы Q_d и Q_n можно было измерять непосредственно, что делалось помощью вертушек. В одном из опытов при наибольшем расходе ирригационный канал был закрыт, и измерение Q_n не производилось; расход Q_m непосредственно измерить с достаточной точностью можно было только в напорных трубопроводах, что было бы достаточно сложно и потребовало бы на подготовку значительного времени; поэтому было решено использовать данные по приемочным испытаниям турбины 2-й очереди. По ним можно было определить для числа оборотов и напора, при которых производились испытания, достаточно точно расход турбины по показаниям киловаттметра на щите. Кроме того при двух опытах с пропуском через быстроток расходов $1,54$ и $4,57 \text{ м}^3/\text{сек}$ произведены были контрольные замеры в самом быстротоке в его нижнем сечении (створ 1) где, как уже упоминалось выше, насыщение воды

воздухом при этих опытах отсутствовало. Эти контрольные замеры показали, что по 1-му способу расход определялся достаточно точно и расхождение с контрольным измерением было максимум на 4% — что позволило при максимальном расходе ($Q = 6,18 \text{ м}^3/\text{сек}$) ограничиться только одним замером, так как при этом расходе насыщение воздухом имело место даже и в конечной расширяющейся части. Таким образом было пропущено через быстроток и замерено 3 расхода — 1,54, 4,57 и 6,18 $\text{м}^3/\text{сек}$.

При всех этих расходах одновременно производились следующие измерения:

1. Скорость течения в сечениях 2, 9, 11, 13 на пяти вертикалях в каждом сечении при помощи обычной гидрометрической вертушки Отта тип Техас; из за малых глубин на каждой вертикали брало в тько по одной точке. Вертушка закреплялась в точке замера на эллиптической

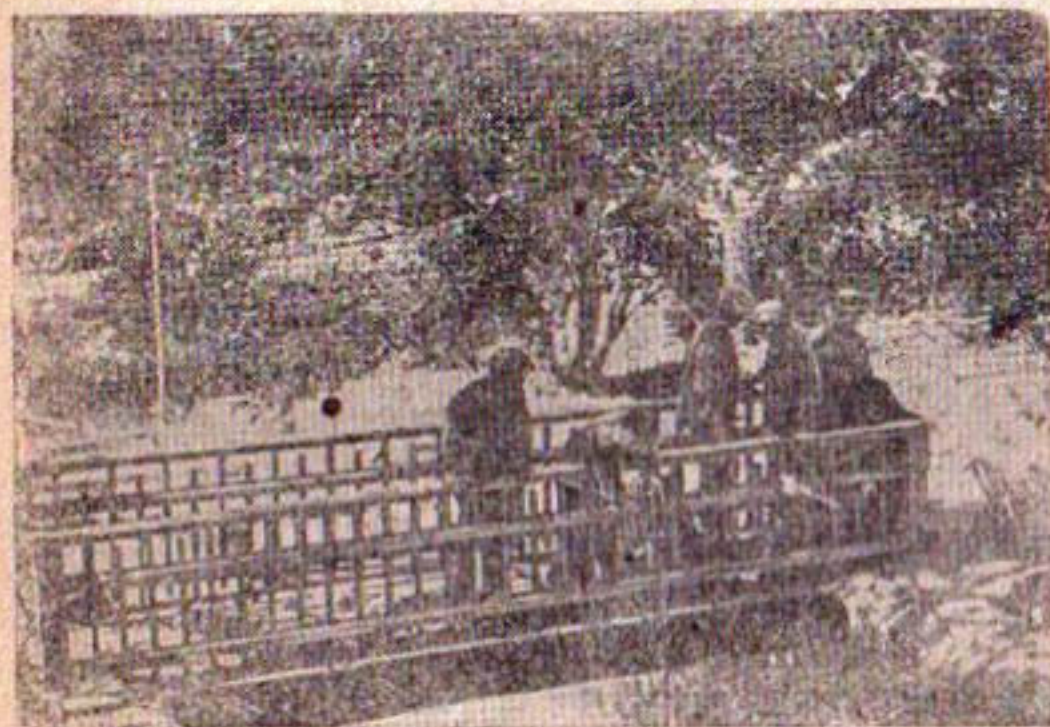


Рис. 24. Измерение скоростей трубкой Пито на поперечи. № 13.

штанге размером $4 \times 2,5 \text{ см}$ на данной вертикали, на определенном расстоянии от дна в зависимости от глубины воды; 4 рабочих держали ее на вертикали, упирая концы штанги в дно и при маявверху (0,8 м от конца) штангу к мостику. Кроме того штанга удерживалась дополнительно двумя растяжками из бронзового тросика. Вся трудность заключалась в удержании вертушки перпендикуляр-

но к сечению, т. е. острым концом штанги против течения, так как при малейшем ее отклонении от нормали усилие воды на штангу и вертушку сильно возрастало и вертушку вместе со штангой выбрасывало из воды. При пробных измерениях, когда еще у рабочих было мало опыта, вертушку течением воды повернуло боком, растяжки не успели вовремя ослабить, штанга на расстоянии 0,8 м от конца переломилась, и вертушка была спасена только благодаря растяжкам.

Отсчет звонков и времени между ними производился при помощи электрического счетчика и секундомера Отта. Максимальная, измеренная вертушкой скорость равнялась 12,7 $\text{м}/\text{сек}$.

Кроме вертушки для контроля, скорости в тех же сечениях и вертикалях замерялись трубкой Пито, которая представляла собой согнутую металлическую трубку диаметром в 10 мм, снабженную сверху пружинным манометром и краном для выпуска воздуха. Трубка была прикреплена хомутиками к штанге из полосового железа, по которой могла

передвигаться. Штанга была внизу заострена. При оперттой на дно штанге трубку можно было устанавливать на любую глубину (рис. 24). Производство измерений трубкой Пито было гораздо удобнее, чем пертушкой из-за малой ее поверхности сопротивления; кроме того малый диаметр трубки позволил в некоторых опытах произвести замер скоростей даже в 2 точках по вертикали. Основным же недостатком трубки Пито при такого рода измерениях, как мы увидим ниже, является невозможность с достаточной точностью судить по ее показаниям о действительной величине скорости смеси воды с воздухом.

Кроме измерений скоростей по вертикалям в отдельных створах измерялись поверхностные скорости на отдельных участках при помощи обычных поплавков и засечек по секундомеру.

Глубины воды во всех сечениях на 3—5 вертикалях измерялись специально изготовленной штангой эллиптического сечения с делениями на сантиметры.

Для непосредственного определения насыщения воды воздухом предполагалось применить батометр системы инж Жуковского малой модели, представляющий собой горизонтальный металлический цилиндр, укрепленный на штанге и снабженный двумя крышками, которые можно одновременно захлопывать, отсекая таким образом объем воды или воды с воздухом в потоке, равный объему цилиндра.

В результате многочисленных проб этого прибора от него пришлось отказаться, так как в быстротекущей воде им работать было трудно из-за большой его поверхности (особенно при захлопывании крышек). Кроме того, чтобы при таких больших скоростях получать достоверные данные, необходимо было иметь точную одновременность захлопывания обеих крышек, что в приборе не осуществлялось.

Кроме перечисленных основных замеров и наблюдений проводились еще вспомогательные наблюдения, как-то: запись (через каждые пять минут) мощностей работавших агрегатов, отметок верхнего и нижнего бьсафа, показаний манометров и пр. При каждом испытании общее количество участников (вместе с чернорабочей силой) было от 15 до 20 человек.

4. ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Полученные при опытах данные обработаны в даваемые ниже таблицы и графики.

При этой обработке введем обозначения:

v_1 — для действительной скорости смеси воды с воздухом (в точке или средней по сечению), h_2 и ω_2 для действительных глубины и сечения; если бы вода не содержала воздуха, но двигалась с той же скоростью v_1 , то она занимала бы сечение ω_1 при глубине h_1 ; расход протекающей воды — Q_1 , расход протекающей смеси — Q_2 ; если бы расход

Q_1 занимал все сечение ω_2 , то он двигался бы со скоростью $v_2 = \frac{Q_1}{\omega_2}$.

Таким образом кроме действительного течения с величинами v_1 , h_2 , ω_2 мы можем представить себе два фиктивных: 1) v_1 , h_1 , ω_1 для чистой

воды с действительной скоростью и 2) с v_2 , h_2 , ω_2 для смеси с фиктивной скоростью¹⁾).

Далее, введем обозначение для понятия, характеризующего содержание воды и воздуха в смеси. Можно было бы назвать „насыщением воздухом“ или „воздухосодержанием“ величину α , равную отношению объема воздуха в смеси к самому объему смеси. Однако удобнее пользоваться величиной $\beta = 1 - \alpha$, которая представляет отношение объема воды в смеси к объему самой смеси. Эту величину удобно назвать „водосодержанием“ смеси. Она, очевидно, равна удельному весу γ_2 смеси.

Обработку измерений можно разбить на следующие пять разделов:

А. Определение расхода воды Q_1 через быстроток.

а) По данным вертушек графо-аналитическим способом были подсчитаны расходы по деривационному (Q_d) и ирригационному (Q_u) каналам за каждое испытание.

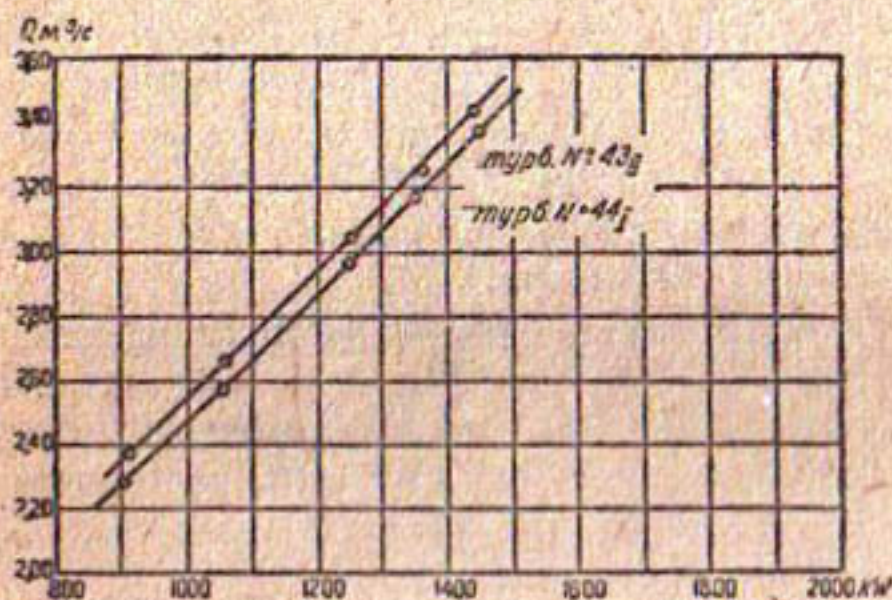


Рис. 25. График $Q = f(N)$.

б) По построенному на основе данных испытаний турбин графику $Q_m = f(N)$ (рис. 25) и при известной мощности работавшего во время испытаний агрегата был определен расход Q_m для каждого испытания.

в) Из равенства $Q'_1 = Q_d - (Q_m + Q_u)$ определялся расход через быстроток.

г) По данным измерения скоростей вертушкой в створе 2 (створ, где насыщение воды воздухом при 1-м и 2-м опытах отсутствовало) графо-аналитическим способом определялся расход Q'_1 для этих двух опытов.

д) Для первых двух опытов по Q'_1 и Q''_1 определялся расход Q_1 как средний арифметический из них; для третьего опыта Q_1 принималось равным Q'_1 .

Б. Определение средних скоростей v_1 течения смеси воды с воздухом в различных сечениях быстротока.

По данным измерениям вертушкой и трубкой Пито в ряде точек по сечению графо-аналитически определялась средняя скорость в каждом сечении (рис. 26, 27, 28). Скорости для вертушки подсчитывались по ее тарировочным кривым для чистой воды (без воздуха), считая, что

¹⁾ На рис. 29 у глубины h вместо индексов 1 и 2 употреблены пометки брутто и нетто.

при больших скоростях вертушка дает одни и те же показания при разных удельных весах жидкости.

Это положение принято на основе опытов проф. М. А. Великанова по сравнению тарировок вертушек в воде и в воздухе¹⁾.

При измерениях трубкой Пито скоростного напора в воде с воздухом нужно для вычисления скорости v_1 , очевидно, пользоваться не обычной формулой:

$$H = \frac{v_1^2}{2g}, \quad (A)$$

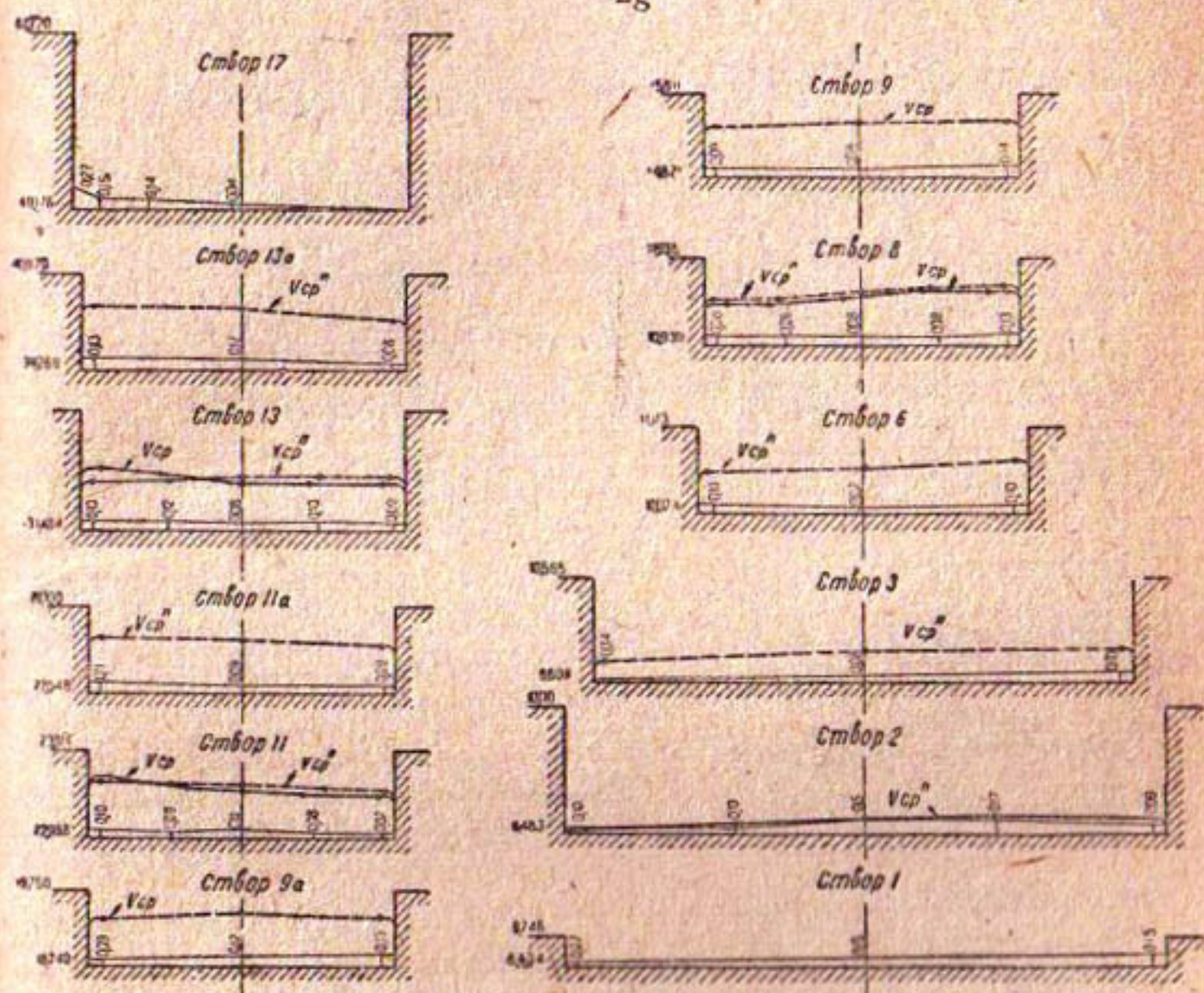


Рис. 26. Скорости и глубины в различных сечениях быстротока при $Q = 1,56 \text{ м}^3/\text{сек.}^2)$

а исправленной на отличие удельного веса смеси от удельного веса воды, т. е. формулой:

$$H = \frac{v_1^2}{2g\beta}, \quad (B)$$

где в обоих случаях H есть давление по манометру, перечисленное на метры водяного столба над поверхностью потока.

¹⁾ М. А. Великанов — Воздушная тарировка гидрометрических вертушек, Известия Научно-мелиорационного института, выпуск XVIII.

²⁾ Пунктирные кривые на рис. 26, 27 и 28 нанесены по замерам трубкой Пито, сплошные — вертушкой.

глубинам на различных вертикалях. В некоторых створах глубины были замерены на 5 вертикалях, в остальных на 3.

Г. Определение водосодержания β смеси.

При известных для каждого сечения Q_1 , ω_2 и v_2 водосодержание смеси легко вычислялось по уравнению:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Q_1}{\omega_2 v_1} = \beta.$$

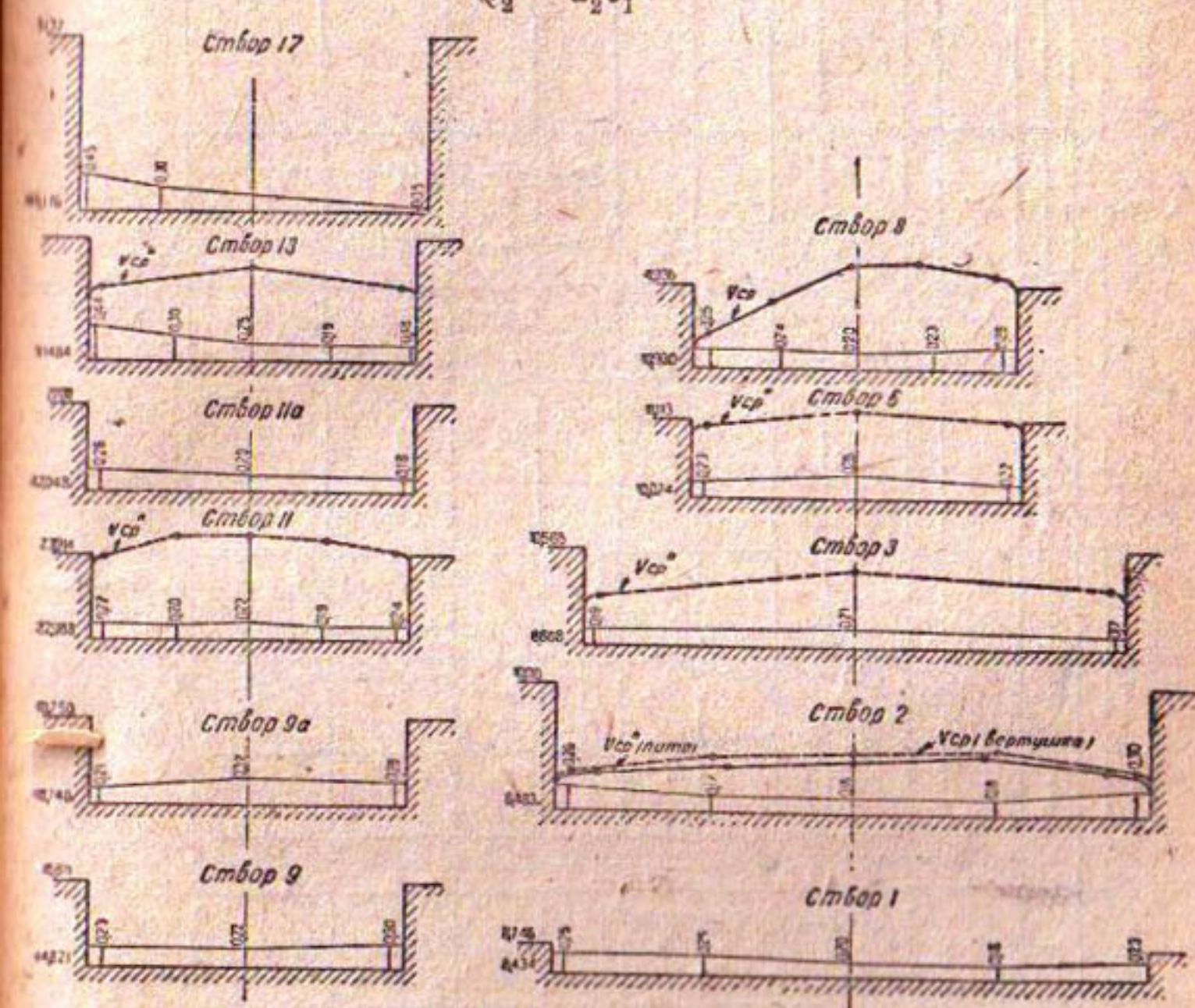


Рис. 28. Скорости и глубины в различных сечениях быстротока при $Q = 6,18 \text{ м}^3/\text{с.к.}$

Д. Определение приведенных площадей ω_1 и глубин h_1 .

Эти величины вычислялись по уравнениям:

$$h_1 = \beta h_2$$

$$\omega_1 = \beta \omega_2.$$

Наконец были подсчитаны поверхностные скорости на отдельных участках быстротока, замеренные, как указано ранее, при помощи обычных поплавков.

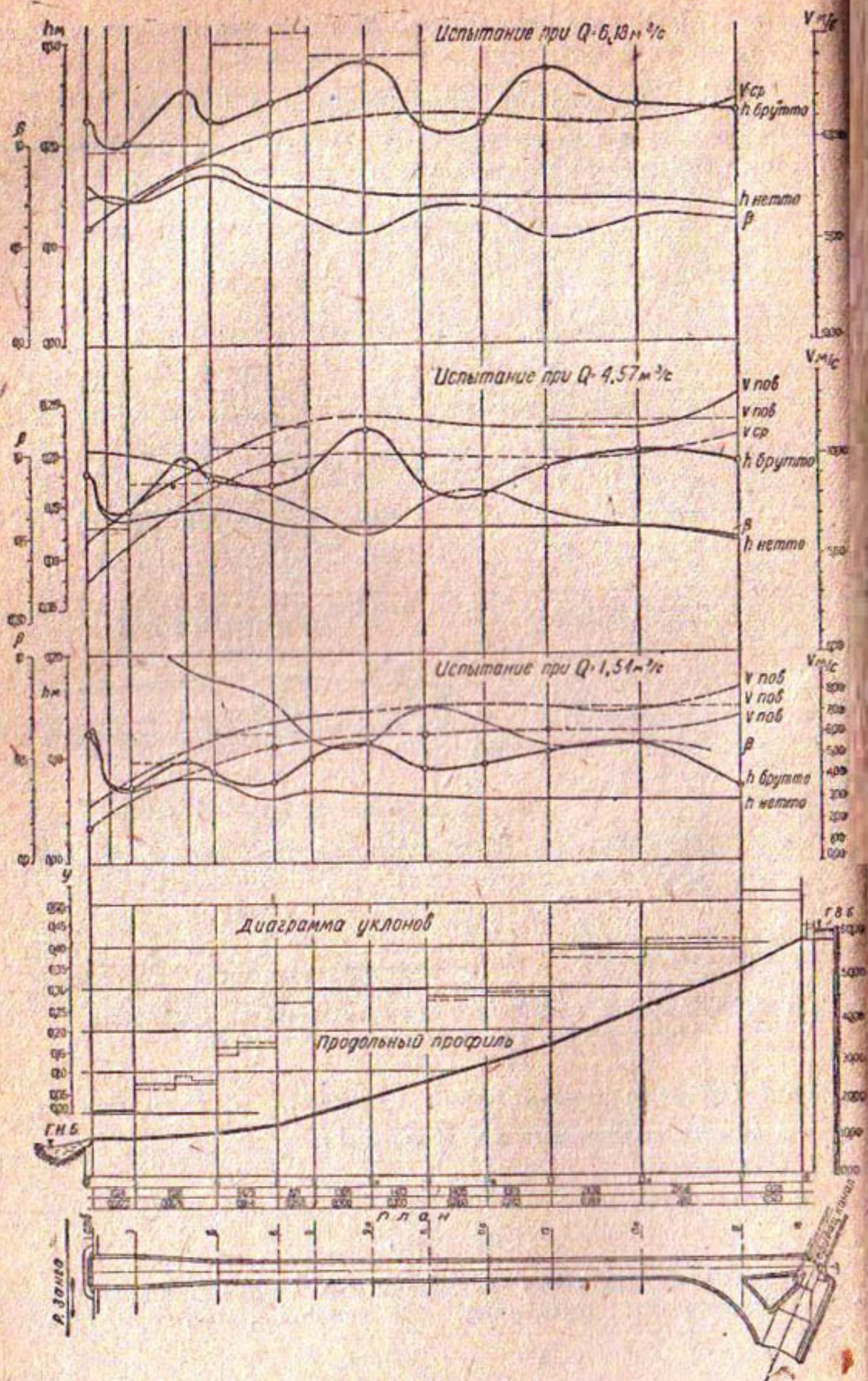


Рис. 29. График изменения v , h , и β по длине быстротока за все три испытания

Все эти данные внесены в таблицу 2, где можно проследить весь ход вычислений; они же изображены на рис. 29, где по длине быстротока нанесены кривые изменения: 1) средних и поверхностных скоростей v_1 и $v_{\text{пог}}$; 2) глубин h_2 и h_1 ; 3) водосодержания β . Так как измерения вертушкой и трубкой Пито были произведены не во всех местах, то для проведения кривой v_1 пришлось воспользоваться и характером изменений поверхностной скорости при среднем значении

$$\frac{v_1}{v_{\text{пог}}} = 0,85.$$

Из рассмотрения таблицы 2 и рис. 29 можно сделать пока такие выводы:

1. Характер изменения действительных глубин h_2 по длине быстротока довольно однообразен при всех 3 испытаниях с характерным увеличением их между сечениями 17—13 (уменьшение уклона), с резким увеличением на участке 11—9 (увеличение уклона) и с их понижением в конце перед сливом (резкое уменьшение уклона). Указанное сходство характера кривых h_2 для всех 3 опытов указывает на отсутствие случайных ошибок. Максимальная замеренная глубина равна 0,45 м и средняя 0,17—0,26 м.

В поперечных сечениях наблюдается увеличение глубин к правому или левому берегу, что объясняется несимметричным входом воды в лоток и вследствие этого зигзагообразным направлением течения в плане по всей длине быстротока.

2. Скорости v_1 получились постепенно уменьшающимися при трех разных расходах соответственно от 12 до 6, от 10 до 4 и от 7 до 2 м/сек.

3. Водосодержание β получилось равным в среднем 0,65, а на некоторых участках при большом Q_1 и до 0,50; иначе говоря, насыщение воздухом $\alpha = 1 - \beta$ доходит до 50%.

Дальнейшая обработка полученных материалов заключалась в определении коэффициента шероховатости лотка и в определении зависимости скоростей и водосодержания от гидравлических элементов.

Прежде чем перейти к окончательным выводам по этой части работы, приведем вкратце методику и результаты других известных нам исследований быстротоков как в лаборатории, так и в натуре.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕРЕВЯННОГО БЫСТРОТОКА В ВЕНСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ВОДНОГО И ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВ.

Работа, аналогичная настоящей, с той же целью установления законов течения воды в лотках с большим уклоном и отыскания зависимости получаемого при этом воздухом насыщения от гидравлических элементов лотка была проведена в Венской лаборатории водного и лесного хозяйства под руководством инж. Эренбергера¹⁾.

¹⁾ Zeitschrift d. Öst. Ing. — u. Arch. ver., Heft 15/16, 17/18, 1926, Seite 155, 175; Gesamtbericht Zweite Weltkraft konferenz Berlin, Band XVIII, 1930; Die Wasserwirtschaft, № 28—29, 1930.

Сечение №	Длина l	Уклон I	Ширина b	17 мая 1930 г.									Q_0
				$Q_0 = 8,69; \quad Q_m = 2,51; \quad Q_n = 0;$ $Q_1 = 6,18 \text{ м}^3/\text{сек}$									
				h_2	ω_2	v_1			$v_{\text{пос}}$	β	h_1	h_2	
					Пито	верт.	прин.						
18	—	—	2,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	15,75	0,523	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
17	—	—	4,16	0,224	0,932	—	—	11,30	—	0,587	0,132	0,185	
13a	48,70	0,390	3,99	0,230	0,920	—	—	10,85	18,25	0,619	0,142	0,194	
13	—	—	4,00	0,266	1,065	9,91	—	10,85	—	0,535	0,142	0,180	
11a	31,20	0,283	3,92	0,216	0,847	—	—	11,00	11,78	0,663	0,143	0,153	
11	—	—	3,80	0,212	0,807	11,76	—	11,0	—	0,678	0,144	0,14	
9a	28,60	0,300	3,82	0,274	1,046	—	—	11,10	14,00	0,533	0,146	0,215	
9	—	—	3,81	0,244	0,928	—	—	10,55	—	0,630	0,154	0,170	
—	9,00	0,258	—	—	—	—	—	—	15,00	—	—	—	
8	—	—	3,80	0,234	0,886	—	0,14	10,14	—	0,686	0,154	0,163	
—	14,90	0,164	—	—	—	—	—	—	14,50	—	—	—	
6	—	—	3,91	0,217	0,849	9,76	—	9,00	—	0,808	0,175	0,170	
—	6,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	—	0,176	4,40	0,245	1,080	—	—	8,40	9,60	0,681	0,166	0,186	
—	13,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3	—	—	6,45	0,194	1,254	7,64	—	7,00	—	0,704	0,137	0,140	
—	9,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	—	0,0172	7,10	0,203	1,460	6,45	5,69	5,69	9,36	0,744	0,151	0,178	
—	1,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1	—	—	7,20	0,218	1,572	—	—	5,55	—	0,708	0,154	0,177	

Опишем вкратце методику этих исследований и приведем их результаты.

Указанные опыты проведены были в деревянной лотке прямоугольного сечения шириной 25 см и длиной от 16 м при наименьшем уклоне ($\text{tg } \alpha = 0,155$) и до 5,5 м при наибольшем ($\text{tg } \alpha = 0,76$), чего вполне было достаточно для получения в конце лотка равномерного движения воды.

Опыты были произведены при уклонах дна лотка, равных 15,5, 20,6, 49,5, 76,2‰ для каждого из уклонов при четырех расходах, равных 10, 20, 31, 44,5 л/сек.

Таким образом было проведено 20 опытов при скоростях течения от 2,93 до 7,20 м/сек.

При всех этих опытах с некоторым отклонением в ту или другую сторону наблюдалась следующая картина в поперечном сечении потока (рис. 30).

Сверху видны отдельные капли воды, несущиеся в воздухе, затем слой воды с отдельными пузырьками воздуха и наконец у дна имеется чистую воду.

ито быстотока

18 мая 1930 г.							16 мая 1930 г.						
$Q_m = 5,11;$ $Q_1 = 4,57 \text{ м}^3/\text{сек}$							$Q_0 = 7,99;$ $Q_m = 5,44;$ $Q_1 = 1,54 \text{ м}^3/\text{сек}$ $Q_u = 908;$						
v_1		$v_{нов}$	β	h_1	h_2	ω_2	v_1			$v_{нов}$	β	h_1	
верт.	прин.						Пито	верт.	прин.				
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	10,40	—	0,572	0,106	0,070	0,272	—	—	7,00	—	—	0,053	
—	9,55	11,25	0,619	0,120	0,112	0,447	7,30	—	6,15	7,53	0,560	0,063	
—	9,40	—	0,680	0,12	0,107	0,429	6,41	6,32	6,32	—	0,568	0,061	
—	9,45	11,10	0,810	0,123	0,095	0,374	6,39	—	6,35	7,55	0,650	0,062	
9,49	9,50	—	0,771	0,126	0,091	0,345	6,85	6,15	6,15	—	0,726	0,066	
—	9,65	11,40	0,578	0,124	0,115	0,438	6,47	—	6,10	7,20	0,576	0,066	
—	9,60	—	0,710	0,125	0,099	0,376	6,23	—	5,90	—	0,694	0,069	
—	—	10,97	—	—	—	—	—	—	—	6,87	—	—	
9,25	9,25	—	0,796	0,130	0,078	0,342	6,27	5,71	5,71	—	0,790	0,061	
—	—	9,98	—	—	—	—	—	—	—	6,42	—	—	
—	7,90	—	0,873	0,148	0,086	0,336	5,49	—	4,85	—	0,945	0,081	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	7,28	8,25	0,76	0,143	—	—	—	—	4,25	4,80	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	5,37	—	0,946	0,132	0,074	0,481	3,65	—	3,20	—	1,000	0,074	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3,62	3,62	6,30	1,000	0,178	0,128	0,906	—	—	1,70	3,34	1,000	0,128	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	3,40	—	1,000	0,177	0,124	0,895	—	—	1,72	—	1,000	0,524	

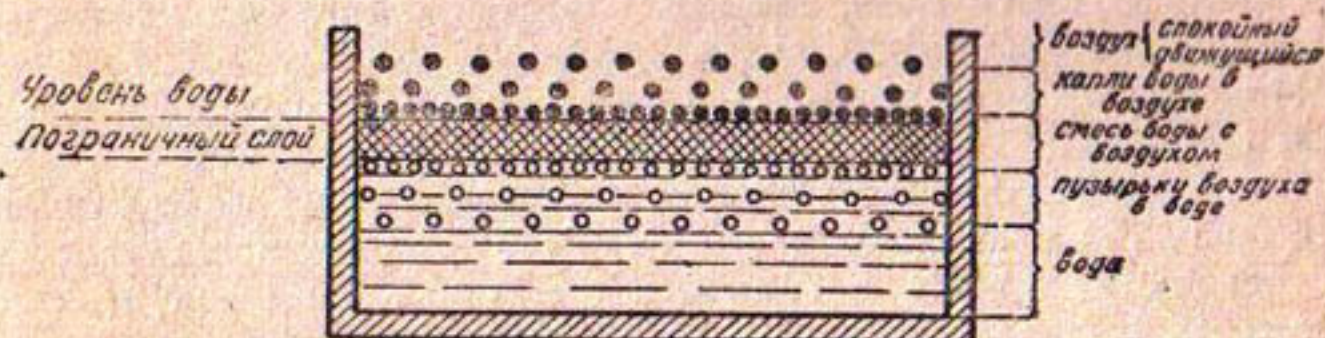


Рис. 30. Схематическое изображение поперечного сечения лотка.

Между слоем смеси и слоем чистой воды имеется более или менее ярко выраженный пограничный слой, который перемещается вверх или вниз в зависимости от скорости течения, доходя при некоторых скоростях (малых) до поверхности, а при других (больших) до дна.

При каждом из опытов производились следующие замеры:

1. Измерение глубин производилось плоским стержнем, передвигаемым в поперечных сечениях лотка; было принято, что стерж-

жень касается струи, если он, поставленный широкой стороной нормально к течению, испытывает заметные удары от несущихся капель.

2. Измерение поверхностных скоростей фотографическим способом при освещении переменным током производилось так. Обыкновенные спичечные коробки с зажженным магнием пускались по лотку в виде поплавков. По длине лоток был размечен через каждый 1 м определенными метками. Поплавки фотографировались с выдержкой от 0,1 до 0,2 сек. Так как скорости были сравнительно большие, а участки с равномерным течением незначительные (особенно при больших уклонах), то время прохождения поплавком определенного расстояния должно было учитываться по возможности точно. Для этой цели у лотка устанавливались часы с белой стрелкой, которая вращалась по черному фону; изображение

этих часов и светящиеся поплавки попадали при съемке на одну пластинку.

При фотографировании освещение производилось при помощи дугового фонаря в 25 000 свечей, питаемого переменным током. При этом на фотографической пластинке получалось несколько светлых изображений стрелок на темном фоне, а промежуток времени между двумя положениями стрелок равнялся точно 0,01 сек при числе периодов переменного тока 50. При колебании числа периодов в секунду не более как на 2 единицы время между двумя положениями стрелки определялось с точностью до 0,0004 сек, т. е. до 4%. Все измеренные таким образом скорости относились к основанию поплавка, а не к

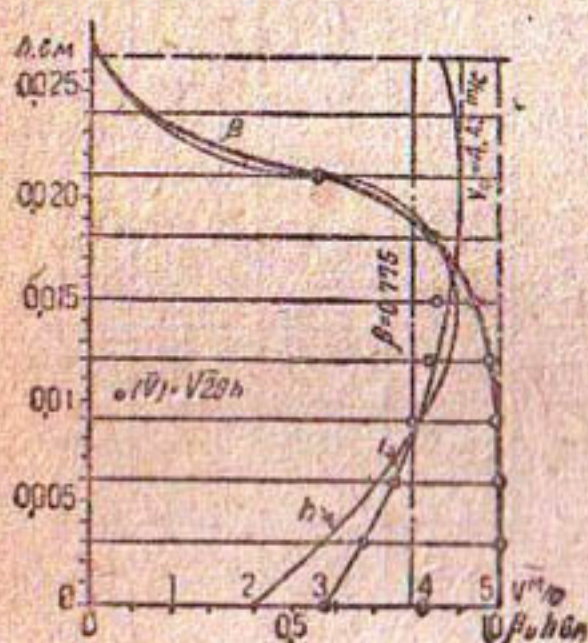


Рис. 31. График и изменения β , h и v по вертикали.

самому поверхностному слою, так как поплавок погружался на некоторую величину, которая определялась особо.

3. Измерение напора H трубками Пито производилось обычным способом.

Далее этот напор изображался для каждого сечения как функция глубины (рис. 31) и вычислялся средний напор для сечения.

По напору H трубки вычислялась для точек ниже пограничного слоя скорость течения воды по обычной формуле:

$$v_1 = \sqrt{2gH}.$$

Ряд таких скоростей и поверхностная определяли кривую скорости в сечении как функцию глубины (рис. 31) и позволяли вычислить среднюю скорость как среднюю абсциссу этой кривой.

Водосодержание β в каждой точке определялось по уравнению:

$$\beta = \frac{2gH}{v_1^2}.$$

где H и v_1 брались по указанным кривым. Получалась кривая водосодержания как функция глубины (рис. 31); средняя абсцисса этой кривой давала β для всего сечения.

Однако указанное значение v_1 является средним по глубине, но не средним по расходу, так как водосодержание на разных глубинах различное. Точнее получается среднее v_1 по формуле:

$$\text{среднее } v_1 = \frac{\sum \beta_i v_i}{\sum \beta_i},$$

где β и v_1 взяты по графику для тонких слоев струи.

Вторым способом для определения среднего водосодержания является уравнение:

$$\beta = \frac{Q_1}{\omega_2 v_1}.$$

Оба эти значения β почти совпадают между собою и даны в предпоследнем столбце таблицы 3.

Третьим способом явился такой: уравнение $\beta = \frac{2gH}{v_2}$ и предыдущее дают уравнение:

$$\beta = \frac{Q_1^2}{2gH\omega_2^2}.$$

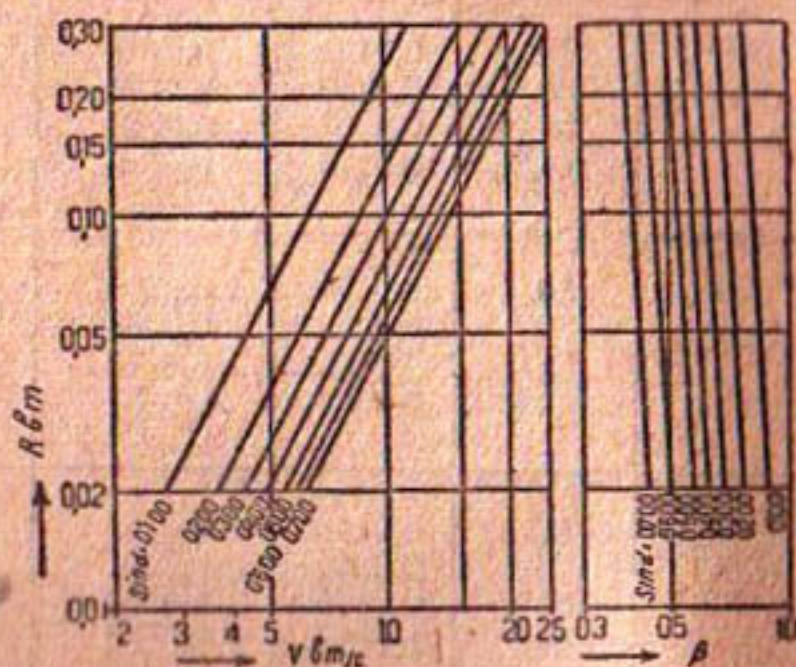


Рис. 32. График $v=f(RI)$ и $\beta=f(RI)$ по данным Эренберга.

Подсчитанные по нему значения β в общем несколько меньше. Они даны в последнем столбце таблицы 3.

По этой таблице был построен график для скорости и водосодержания в логарифмических координатах, при помощи которых были установлены зависимости $v_1=f(R_2I)$ и $\beta=f(R_2I)$, причем за уклон принят не тангенс, а синус α , что теоретически правильнее. Эти уравнения таковы:

$$v_1 = 55R_2^{0,52} \sin \alpha^{0,4}, \quad (1)$$

$$\beta = 0,40R_2^{-0,06} \sin \alpha^{-0,36}, \quad (2)$$

для $\sin \alpha < 0,476$, т. е. $\alpha < 28,5^\circ$,

$$\beta = 0,28R_2^{-0,05} \sin \alpha^{-0,74}, \quad (3)$$

для $\sin \alpha > 0,476$, т. е. $\alpha > 28,5^\circ$.

Уравнения годны для $R_2 \leq 0,3$ м и $\sin \alpha \leq 0,7$, т. е. $\alpha \leq 45^\circ$. Переход от (2) к (3) вероятно соответствует прикосновению пограничного слоя ко дну русла. Эти зависимости изображены на рис. 32.

Таблица 3

Результаты опытов в Венской лаборатории

Уклон	Расход	Глубина	Гидравл. радиус	Скорость	Водосодержание	
$\operatorname{tg} \alpha$ ($\sin \alpha$)	Q_1	h_2	R_2	v_1	$\beta = \frac{Q_1}{\omega_2 v_1}$	$\beta = \frac{Q_1}{2 g H \omega_2}$
155‰ (0,153)	10	0,0175	0,0153	2,93	0,790	—
	20	0,0275	0,0220	3,64	0,790	0,763
	31	0,0375	0,0280	4,05	0,807	0,813
	44,5	0,0490	0,0350	4,43	0,801	0,783
206‰ (0,202)	10	0,0160	0,0146	3,12	0,770	—
	20	0,0260	0,0218	3,98	0,750	0,701
	31	0,0360	0,0282	4,48	0,750	0,728
	44,5	0,0470	0,0345	4,89	0,758	0,762
320‰ (0,305)	10	0,0150	0,0138	3,50	0,729	0,638
	20	0,0250	0,0208	4,41	0,716	0,678
	31	0,0350	0,0274	4,97	0,704	0,694
	44,5	0,4600	0,0337	5,35	0,707	0,714
495‰ (0,444)	10	0,0145	0,0130	4,03	0,675	—
	20	0,0240	0,0201	5,12	0,644	0,613
	31	0,0340	0,0267	5,71	0,631	0,612
	44,5	0,0450	0,0332	6,15	0,635	—
0,762‰ (0,606)	10	0,0160	0,0142	4,81	0,513	0,481
	20	0,0260	0,0215	5,93	0,512	0,486
	31	0,0360	0,0279	6,66	0,510	0,508
	44,5	0,0475	0,0345	7,20	0,513	—

Как видно, β от R зависит очень мало, но сильно от I . Скорость, при которой начинается первое отделение капель, составляет около 3 м/сек; при скорости в 4 м/сек воздухомыщение становится заметным.

Эренбергер сверил свои выводы с результатами исследования быстротока на Руюцкой гидроэлектростанции¹⁾ (Ruetzwerk).

Этот быстроток трапециoidalного сечения с шириной по дну 2,5 м уклоном в 37°,5 и с общей длиной 223,20 м, рассчитанный на максимальный расход $Q=5,4$ м³/сек был исследован в период с 1913 по 1923 г. различными исследователями с замером $v_{\text{пов}}$, Q_1 и h_2 .

Результаты всех этих измерений приведены в таблице 4, где вычисление величины β производилось следующим образом: по замеренным величинам $v_{\text{пов}}$, Q_1 и h_2 были вычислены величины $v_1=0,9 v_{\text{пов}}$ и R_2 .

¹⁾ Wasserkraftjahruch, 1924, Seite 369.

Таблица 4

Измерения произведены	Инж. Румелиным 1913 г.		Гидротехническим институтом 1923 г.					Акц. общ. "Wasserkraftwerk" (Wag)					Примечание
Q_1 в $м^3/сек$. . .	0,50	0,80	3,40	0,79	1,02	1,48	3,66	0,43	1,60	1,77	1,99	4,30	Велич. измеренные
$v_{пов}$ в $м/сек$. . .	8,0	10,9	19,0	12,0	13,8	16,0	19,3	13,4	16,3	16,2	17,0	21,1	
h_2 в $см$	3,0	5,0	15,0	—	—	—	—	8,0	11,4	12,0	13,6	22,4	
$v_1 = 0,9 v_{пов}$. . .	7,20	9,80	17,10	10,80	12,40	14,40	17,40	12,10	14,70	14,60	15,60	19,00	Велич. вычисленные
R_2 в $см$	2,95	4,80	13,60	6,40	8,30	11,00	15,60	11,80	14,20	14,50	15,40	19,50	
ω_1 в $м^2$	0,076	0,130	0,390	0,170	0,275	0,305	0,453	0,206	0,296	0,300	0,353	0,592	
v'_1 в $м^3/сек$. . .	7,20	9,20	16,20	10,80	12,40	14,40	17,40	11,80	14,20	14,50	15,40	19,50	
Q'_1 в $м^3/сек$. . .	0,35	0,53	2,45	0,75	1,05	1,63	3,20	0,95	1,55	1,65	2,05	5,00	
$Q_2 = v'_1 \omega_2$	0,55	1,19	6,33	1,84	2,79	4,41	7,91	2,43	4,21	4,51	5,45	11,52	
β	0,64	0,44	0,39	0,47	0,38	0,37	0,40	0,38	0,37	0,37	0,38	0,45	

затем соответствующие пары величин $\frac{h_2}{v_1}$ и $\frac{v_1}{Q_1}$ были нанесены на график, и через полученные точки проведены уравнивающие кривые. Затем для величин R_2 были взяты уже уравненные величины v_1 и Q_1 , по которым была вычислена величина $Q_2 = v_1 \omega_2$ и $\beta = \frac{Q_1}{Q_2}$.

Ход вычислений виден из таблицы 4.

Кроме этого Эренбергер сравнил свои выводы с неопубликованными результатами исследований на быстротоках гидростанций:

- | | | |
|------------------------------|---|---------------|
| I Даго | } | Индия (1924), |
| II Бенкок | | |
| III Мальниц, Австрия (1928). | | |

Соответствующие данные приведены в таблице 5.

Таблица 5

Скорость и водосодержание в быстротоках
по замерам и формулам

Быстроток	I $\sin \alpha$	Q_1	h_2	ω_2	R_2	Замерено		Вычислено	
						v_1	β	v_1	β
Даго	0,246	1,39	0,195	0,195	0,14	10,10	0,64	11,20	0,64
Бенкок	0,246	0,74	0,13	0,13	0,103	8,60	0,66	9,40	0,65
Бенкок	0,602	6,00	0,67	0,67	0,286	23,5	0,338	23,60	0,44
Мальниц ⁴⁾	0,602	2,90	0,37	0,37	0,212	20,5	0,38	20,00	0,44
Мальниц ⁴⁾	0,408	4,70	0,375	0,778	0,281	20,90	—	20,00	0,54
Мальниц ⁴⁾	0,403	3,80	0,35	0,725	0,267	19,20	—	19,40	0,54

В общем опыты Эренбергера надо признать очень ценными. Однако они производились только над деревянным быстротоком. Сам исследователь как будто распространяет их и на все другие, так как он проверял свои формулы на быстротоках не только деревянных (Рюецкий) но и бетонных (Мальниц). Казалось бы, если формулы Эренбергера точны, то они не могут быть распространены без дальнейших исследований на все разнообразие стенок строительной практики.

Сравним скорости, получаемые по формуле (1), Эренбергера со скоростями по обычной формуле Шези с коэффициентами шероховатости по Гангиле и Куттеру, для чего вычертим $v_1 = f(I)$ при $R = \text{const}$. Примем $n_1 = 0,010$ соответственно шероховатости венского быстротока. Увидим (рис. 33), что почти везде скорости по Эренбергеру меньше обычных, вода тормозится воздухом насыщением, и происходит по его выражению „самопоглощение энергии“. Чем больше уклон, тем больше и расхождение скоростей из-за малого показателя у Эренбергера при I .

Можно при вычислении скорости значительно приблизиться к данным опыта, не отказываясь от формулы Шези, но повышая расчетную

⁴⁾ Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1932, № 13, Seite 148.

шероховатость. На рис. 33 нанесены такие кривые при $n_2 = 0,013$, следовательно с отношением $\frac{n_1}{n_2} = 0,77$. Соответствующие цифровые значения (по формулам Гангилье и Куттера, а также Павловского) приведены в таблице 6.

Здесь мы в обозначениях n_1 и n_2 придерживаемся системы, уже указанной выше в главе 4: индекс 2 относится к течению с действительными глубинами, а 1 — с глубинами фиктивными.

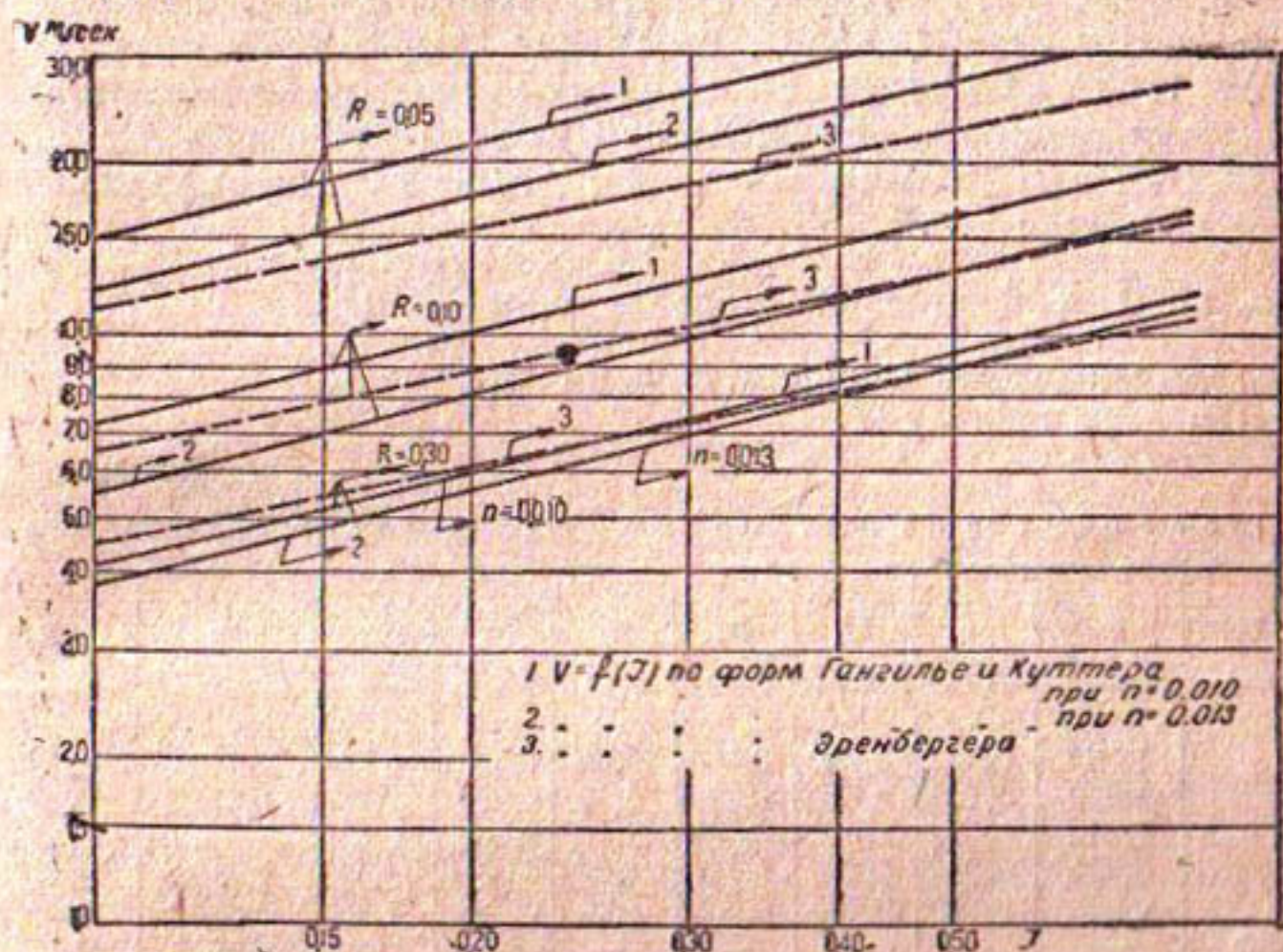


Рис. 33. График $v = f(R)$ при $R = \text{const.}$

Таблица 6

Сравнение скоростей по формулам Шели и Эренберге́ра

R	I	Скорость v_1 при $n = 0,010$			Скорость v_1 при $n = 0,013$	
		Гангилье и Куттер	Павловский	Эренбергер	Гангилье и Куттер	Павловский
0,05	0,10	4,25	4,57	4,65	3,70	3,95
—	0,30	7,35	7,90	7,15	6,35	6,80
—	0,50	9,50	10,20	8,80	8,25	8,80
0,10	0,10	7,20	7,50	6,65	5,75	6,20
—	0,30	12,40	13,00	10,30	10,00	10,70
—	0,50	16,00	16,70	12,70	12,80	13,80
0,30	0,10	15,00	14,80	11,80	12,50	12,70
—	0,30	26,00	25,50	18,20	21,60	22,00
—	0,50	33,60	33,00	22,50	28,00	28,30

В дальнейшем нами и предлагается метод расчета быстотоков, основанный на применении формулы Шези с повышением шероховатости.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОТОКОВ НА УСТАНОВКЕ БОЙС.

На установке Boise Project в штате Айдаго в США имеется пять бетонных быстотоков (I — Mora, II — Valley Mound, III — Arewa, IV — Lizard № 1, V — Lizard № 2). Они были испытаны Государственным департаментом земельных улучшений¹⁾. При этом замерялись h_2 , ω_2 , v_1 и Q_1 . По этим данным вычислялись по Гаггиле и Куттеру коэффициенты n для двух случаев:

1) n_2 по ω_2 и фиктивной скорости $v_2 = \frac{Q_1}{\omega_2}$ и

2) n_1 по замеренной скорости v_1 и по ω_1 .

Расчеты дали таблицу 7.

Таблица 7

Результаты опытов на установке Бойс (в метрических мерах)

Быстоток	b	l	Q_1	h_2	v_2	h_1	v_1	n_2	n_1
I	1,520	0,031	0,780	0,098	5,40	0,0760	6,75	0,0104	0,0072
II	1,520	0,158	0,630	0,082	5,70	0,0520	9,00	0,0112	0,0078
III	1,830	0,210	1,420	0,096	8,10	0,0870	8,95	0,0112	0,0098
IV	0,935	0,082	0,465	0,110	4,60	0,0860	5,82	0,0124	0,0091
V	0,940	0,200	0,465	0,093	5,40	0,0695	7,28	0,0142	0,0098
Среднее	—	—	—	—	—	—	—	0,0120	0,0090

Дополнительно к этой таблице, данной Этчеверри, сделаем подсчеты 1) для водосодержания по формуле:

$$\beta = \frac{Q_1}{\omega_2 v_1},$$

2) то же по формуле (2) Эренбергера, 3) для числового множителя в его формуле (1), который мы обозначим через A и которому он придает значение 55.

Получаем таблицу 8.

Рассмотрение таблиц 7 и 8 показывает, что формула Эренбергера для водосодержания дает здесь результаты, в отдельных случаях довольно далекие от замеров. Множитель A по замерам оказался больше 55, между тем как при шероховатости у бетона большей, чем у дерева,

¹⁾ В. А. Etcheverry — Irrigation Practice and Engineering, стр. 261; Б. А. Этчеверри — Перепады и быстотоки, Вестник ирригации, № 7—9, 1923 г.

Таблица 8
Пересчет таблицы 7

Быстроток	β	Эренбергер	
		<i>B</i>	<i>A</i>
I	0,77	0,87	66
II	0,65	0,79	75
III	0,91	0,68	60
IV	0,77	0,86	56
V	0,76	0,69	60
Среднее	0,77	0,78	63

можно было ожидать его уменьшения. Два значения для n таковы: 0,009, 0,012; отношение их

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,75.$$

Подробности о способах замеров неизвестны, и поэтому нельзя считать эти исследования достаточно надежными.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОТОКОВ БОРОВЕНСКОГО, БАКУРЦИКСКОГО И ДР.

На Боровенской гидростанции имеется быстроток с падением в 14,1 м, длиной 174 м, при среднем уклоне $\operatorname{tg} \alpha = 0,0814$. Он представляет собою лоток трапециoidalного, почти треугольного сечения, собранный из уложенных вдоль бревен, пазы между которыми забраны изнутри треугольными рейками и проконопачены. Этот быстроток был исследован в 1928 г. секцией исследования гидростанций¹⁾, причем при расходе в 0,7 м³/сек были замерены площади сечений на участках с разными уклонами. Результаты замеров даны в таблице 9 в первых пяти столб-

Таблица 9
Результаты исследований на Боровенском быстротоке

Участок	$\sin \alpha$	h_2	R_2	v_2	n_2	<i>AB</i>
1=3	0,0496	0,41	0,135	2,79	0,0180	10,9
3=6	0,0687	0,35	0,167	3,68	0,0200	12,6
6=9	0,0777	0,32	0,182	4,12	0,0203	13,1
9=10	0,0926	0,31	0,192	4,37	0,0213	13,2
10=14	0,1106	0,29	0,139	5,00	0,0169	17,2
14=15	0,0507	0,33	0,178	4,00	0,0173	13,7
Среднее	—	—	—	—	0,019	13,9

¹⁾ Н. М. Шапов — Исследование Боровенской гидростанции, 1930 г., стр. 9.

цах. Коэффициент Гангилие и Куттера получился в среднем 0,019; коэффициент n_1 , если его принять по аналогии с венскими и американскими опытами в 0,75 n_2 , получается равным 0,014, что довольно хорошо подходит к грубой бревенчатой стенке. О столбце АВ будет сказано ниже.

Кроме перечисленных исследований выстроенных быстротоков, можно указать еще на исследования Бакурциковского быстротока, находящегося на Алазанском магистральном канале, произведенные Закавказским опытно-исследовательским институтом водного хозяйства в 1930 г.¹⁾ Быстроток этот трапециoidalного сечения, бетонный, с уклоном 0,046, длиной 850 м, с шириной понизу 4 м, расчетным расходом 16,5 м³/сек. При исследованиях этого сооружения были произведены замеры величин n_2 , $v_{\text{пов}}$, v_1 и Q_1 при расходах от 3,0 до 9,67 м³/сек. К сожалению, результаты этих исследований, повидимому вследствие неточности измерений, не дают возможности сделать на основе их какие-либо выводы, и потому подробного описания их мы здесь и не приводим. Укажем лишь, что величина β при разных расходах была получена равной от 0,80 до 0,40. Максимальная поверхностная скорость 10 м/сек²⁾.

Укажем еще здесь, что в последнее время б. Гидротехгеоинститутом под руководством автора настоящей статьи было произведено испытание выстроенного уже Гизельдонского деревянного быстротока прямоугольного сечения с размером по дну 6,0 м, с уклоном 0,66, рассчитанного на пропуск максимального расхода, равного 90 м³/сек. При этих испытаниях была применена методика более совершенная, чем при всех вышеописанных исследованиях, причем величина β измерялась непосредственно в потоке. Не приводя здесь подробного описания методики и результатов, так как исследования еще не совсем закончены и материалы еще окончательно необработаны, укажем лишь, что предварительные данные по этим опытам полностью подтверждают правильность ниже рекомендуемого нами метода расчета быстротоков с применением старой ф-лы Шези.

Вышеперечисленными быстротоками ограничиваются наши сведения об их исследованиях, но далеко не исчерпывается перечень выстроенных вообще как в СССР, так и за границей и представляющих интереснейшие объекты для научно-исследовательской работы. Из находящихся в пределах СССР укажем на быстротоки Кадырьинской, Баксанской гидроэлектростанции, на Териспольском канале, на Дигорском канале и др.

8. ВЫВОДЫ ИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Перед дальнейшей обработкой наших исследований и сравнением их с другими вначале установим, что при проектировании быстротока важными являются:

1. Определение действительных скоростей v_1 , так как большие их значения могут действовать разрушительным образом на стенки, осо-

¹⁾ Бюллетень Зак. опытно-исслед. ин-та вод. хоз., № 9, 1931 г., стр. 54.

²⁾ В последнее время Закавказским институтом сооружений предполагалось провести повторные исследования этого быстротока.

бенно при наличии наносов; сами эти скорости характеризуются фиктивными глубинами h_1 и сечениями ω_1 .

2. Определение действительных глубин h_2 , так как большие их значения требуют высоких стенок быстротока; сами эти глубины характеризуются действительными сечениями ω_2 и фиктивными скоростями v_2 .

Определение воздухонасыщения или связанного с ним водосодержания β для практики не необходимо, но оно полезно для уяснения самого явления; значение величин v_1 определяет β . Так, перемноживши уравнения (1) и (2) или (3) Эренбергера, получим:

$$v_1 \beta = v_2,$$

а по последней скорости можем рассчитать сначала

$$\omega_2 = \frac{Q_1}{v_2},$$

а затем и h_2 .

Из эриванских опытов мы имеем все перечисленные величины. Подберем такие коэффициенты шероховатости n , которые при тех же расходах и размерах быстротока дали бы по расчету величины, наиболее близкие к замеренным. Таких коэффициентов будет два: n_1 для фиктивного течения с Q_1, ω_1, h_1, v_1 и n_2 для фиктивного течения с Q_1, ω_2, h_2 и v_2 .

Для подбора коэффициента n задаемся разными его значениями (0,014; 0,020; 0,025) и строим продольный профиль неравномерного течения по формуле Бахметева:

$$\frac{IL}{h_0} = \tau_{i2} - \tau_{i1} - (1 - \gamma) [B(\tau_{i2}) - B(\tau_{i1})].$$

При этом коэффициент C в формуле Шези берем по Павловскому:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad \text{где}$$

$$y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,10).$$

За уклон принимаем не тангес, а синус угла наклона. Все построения начинаем от участка 17 — 13 в предположении, что в конце его установилась глубина h_0 равномерного течения.

При таком построении выяснилось, во-первых, что в конце всех участков глубина практически являлась глубиной равномерного течения; во-вторых, что вычисленным по наблюдениям глубинам h_1 соответствует кривая с $n_1 \sim 0,014$, а глубинам h_2 — с $n_2 \sim 0,020 - 0,025$ (таблица 10).

Значение n_1 соответствует, при течении без воздухонасыщения, средней кирпичной кладке и средней бетонировке, что примерно соответствует и эриванским стенкам; вторые же значения для n_2 соответ-

Таблица 10

Вычисление коэффициентов шероховатости по участкам

№ участка	I	I	$Q_1 = 1,54 \text{ м}^3/\text{сек}$					$Q_1 = 4,57 \text{ м}^3/\text{сек}$					$Q_1 = 6,18 \text{ м}^3/\text{сек}$				
			Г л у б и н ы					Г л у б и н ы					Г л у б и н ы				
			измеренные		вычисленные при n			измеренные		вычисленные при n			измеренные		вычисленные при n		
			h_1	h_2	0,014	0,020	0,025	h_1	h_2	0,014	0,020	0,025	h_1	h_2	0,014	0,020	0,025
17	—	—	0,053	0,070	—	—	—	0,106	0,185	—	—	—	0,132	0,224	—	—	—
—	48,70	0,390	0,033	0,112	—	—	—	0,120	0,194	—	—	—	0,142	0,230	—	—	—
13	—	—	0,061	0,107	0,078	0,058	0,096	0,122	0,180	0,113	0,146	0,176	0,142	0,266	0,135	0,176	0,208
—	31,20	0,283	0,062	0,095	—	—	—	0,123	0,153	—	—	—	0,143	0,216	—	—	—
—	—	—	0,066	0,091	0,070	0,035	0,106	0,126	0,164	0,128	0,166	0,200	0,144	0,212	0,153	0,200	0,235
11	28,60	0,301	0,066	0,115	—	—	—	0,124	0,215	—	—	—	0,146	0,274	—	—	—
9	—	—	0,069	0,099	0,083	0,055	0,108	0,125	0,176	0,128	0,165	0,198	0,154	0,244	0,153	0,199	0,236
—	9,00	0,268	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	0,061	0,078	0,092	0,067	0,110	0,130	0,163	0,132	0,172	0,204	0,154	0,234	0,158	0,206	0,242
—	14,90	0,164	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	0,081	0,086	0,102	0,077	0,124	0,148	0,170	0,144	0,198	0,232	0,175	0,217	0,170	0,237	0,236
5	6,00	0,076	—	—	—	0,086	—	—	—	0,153	—	—	0,166	0,245	0,179	—	—

Примечание. Все расчеты проведены от участка 17 — 13 до участка 6 — 5, т. е. до расширяющегося участка с переменным уклоном за отсутствием достаточно точных методов подсчета вычислений на пролетах.

Вычисление коэффициентов шероховатости по сечениям

№ сечений	Уклоны $\text{tg } \alpha$ и $\sin \alpha$	Q_1	h_1	h_2	R_1	R_2	v_1	v_2	n_1	n_2	A
— 17 —	— 0,523 (0,464)	6,18 4,57 1,54	0,132 0,106 0,053	0,224 0,185 0,070	0,125 0,100 —	0,202 0,169 —	11,30 10,40 —	6,60 6,00 —	0,0150 0,0140 —	0,0300 0,0300 —	35 36 —
— 13 —	— 0,390 (0,364)	6,18 4,57 2,54	0,142 1,122 0,061	0,265 0,110 0,107	0,132 0,115 0,059	0,235 0,165 0,102	10,85 9,40 6,32	5,80 6,35 3,60	0,0145 0,0150 0,0145	0,0200 0,0250 0,0300	34 36 31
— 11 —	— 0,283 (0,273)	6,18 4,57 1,54	0,144 0,126 0,066	0,212 0,164 0,091	0,134 0,118 0,054	0,190 0,151 0,087	11,30 9,50 6,15	7,65 7,30 4,45	0,0130 0,0135 0,0140	0,0210 0,0190 0,0200	45 43 37
— 9 —	— 0,300 (0,287)	6,18 4,57 1,54	0,154 0,125 0,069	0,244 0,176 0,093	0,147 0,117 0,056	0,216 0,169 0,094	10,55 9,60 5,90	6,60 6,85 4,10	0,0140 0,0135 0,0150	0,0250 0,0210 0,0220	39 40 33
— 8 —	— 0,268 (0,259)	6,18 4,57 1,54	0,154 0,130 0,061	0,224 0,153 0,078	0,142 0,121 0,059	0,207 0,150 0,087	10,14 9,25 5,71	7,00 7,40 4,50	0,0140 0,0135 0,0140	0,0225 0,0180 0,0200	38 42 32
—	Средние значения:	—	—	—	—	—	—	—	0,0140	0,0220	35,2

А

ствуют грубой бутовой кладке, сухой кладке из крупных камней, мостовой из крупного рваного камня с резкими углами, чего в действительности нет.

Так как в конце участков имеется равномерное течение, то можем сделать новый расчет для коэффициентов n по уравнениям для равномерного течения:

$$v_1 = C_1 \sqrt{R_1 I} \text{ и } v_2 = \frac{Q_1}{\omega_2} = C_2 \sqrt{R_2 I}.$$

По этим уравнениям для отдельных участков ищем C_1 и C_2 , а затем n_1 и n_2 . Значения последних даны в таблице 11, из которой

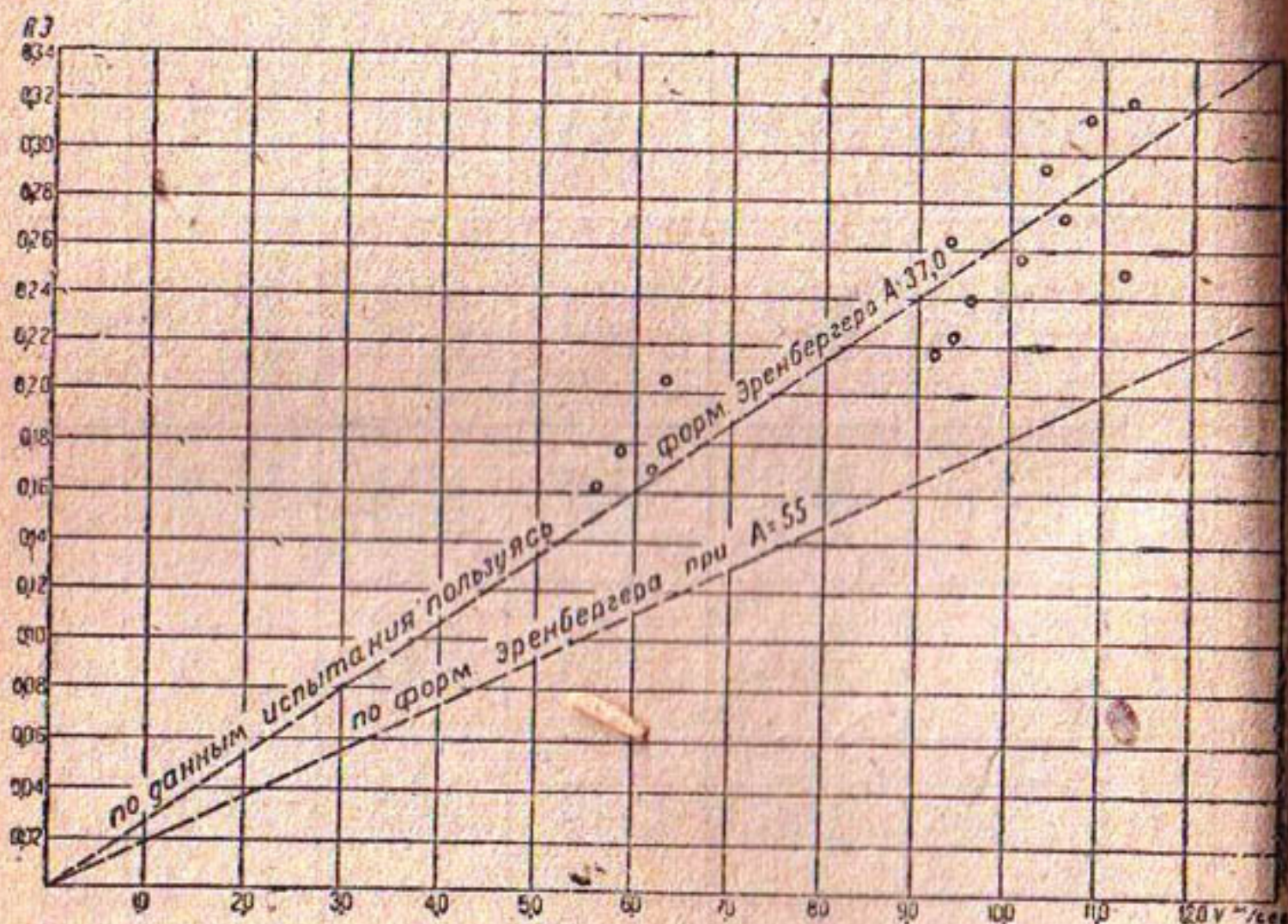


Рис. 34. График $v = \varphi(RI)$.

видно, что $n_1 = 0,014$, а $n_2 = 0,020 — 0,030$, как и по предыдущему подсчету (таблица 10).

Итак, как первый метод подсчета при проектировке быстротока указывается нами такой. Для определения действительных скоростей v_1 пользуемся обычной формулой Шези с коэффициентом n_1 , указываемым в справочниках для данного характера стенок. Для вычисления действительных глубин h_2 вначале вычисляем фиктивную скорость v_2 по такой же формуле, но с повышенным n_2 против n_1 , а затем по ней и действительному расходу Q_1 вычисляем n_2 . Для построения глубин h_2 по всему профилю быстротока можем при этом пользоваться обычными способами построения кривых подпора или спада.

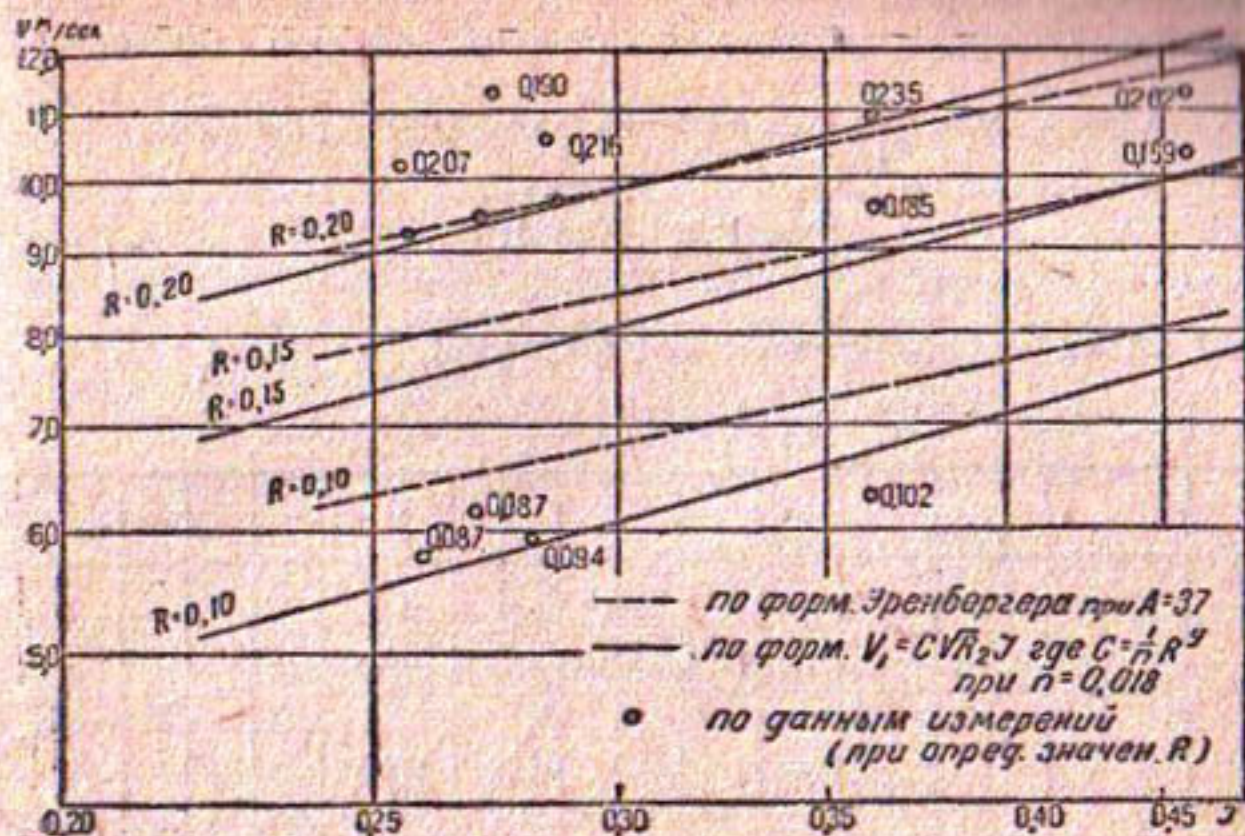


Рис. 35. График $v = \varphi(RJ)$.

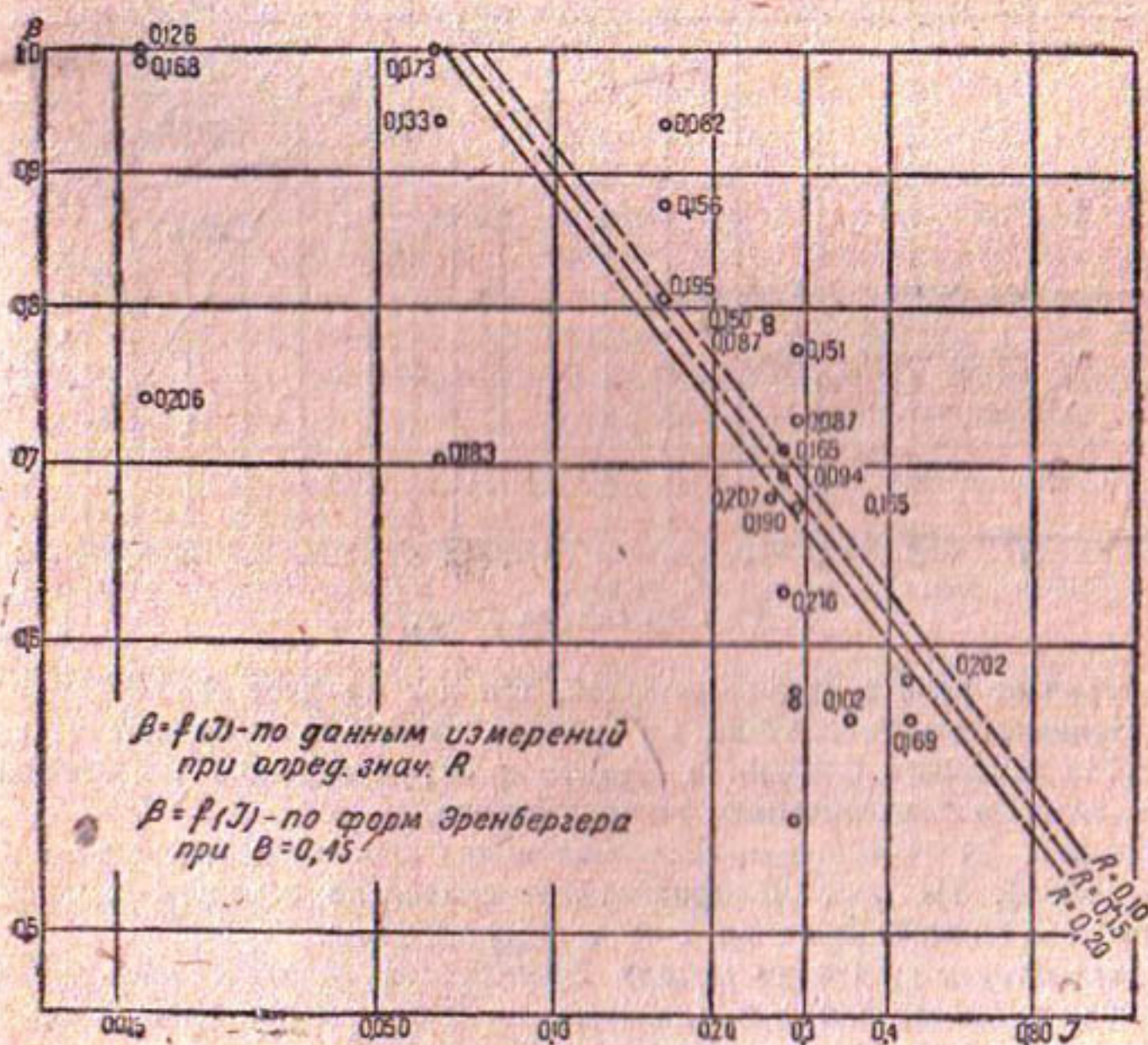


Рис. 36. График $\beta = \varphi(J)$.

только установим, что $\frac{n_1}{n_2}$ тем меньше, чем меньше β , и при

$$\beta = 1 \text{ и } \frac{n_1}{n_2} = 1.$$

Второй метод — Эренбергера; его формула:

$$v_1 = AR_2^{0,72} I^{0,4}$$

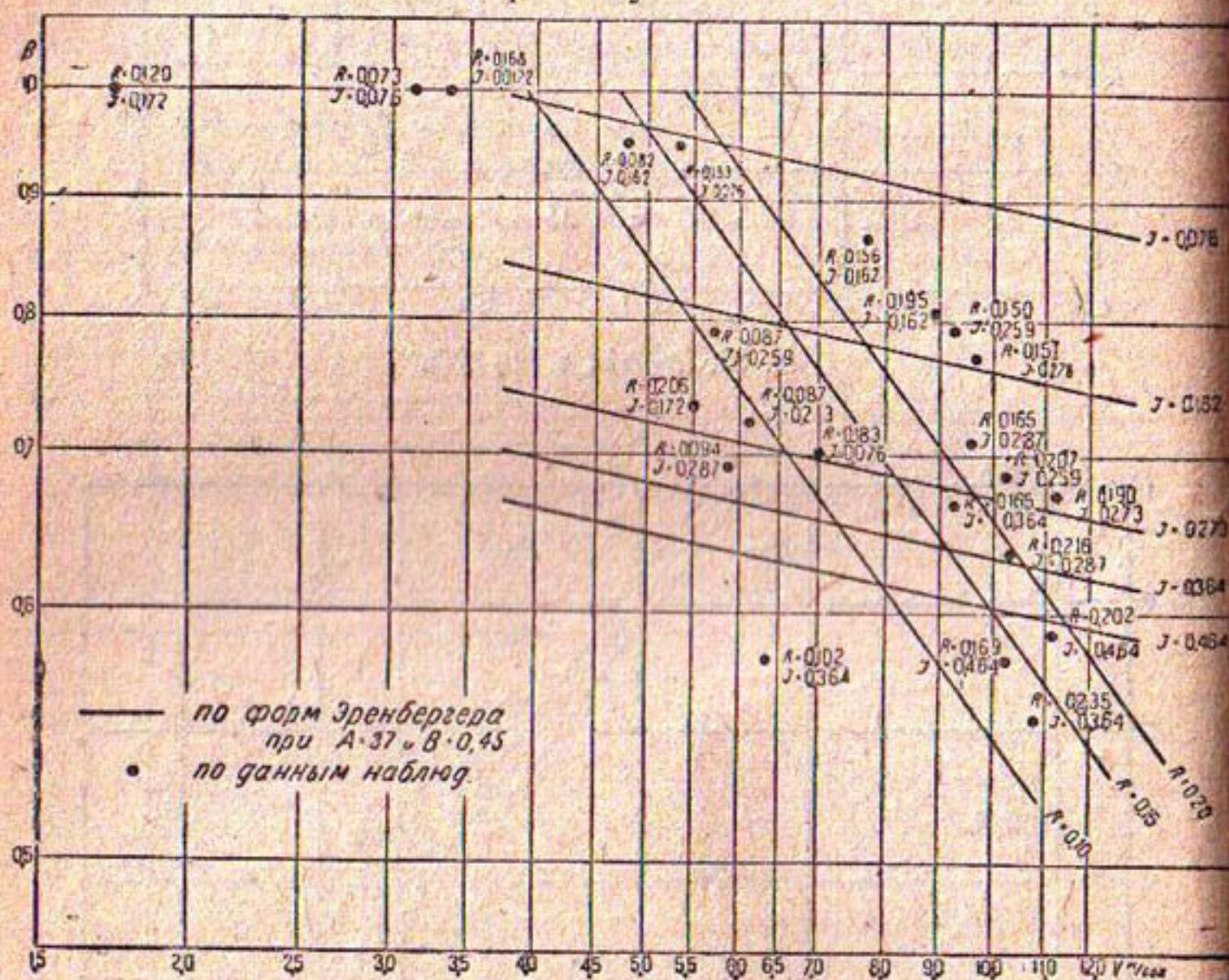


Рис. 37. График $\beta = \varphi(v)$.

не учитывает разных шероховатостей, так как он дает $A = 55 = \text{const}$. Для Эриванского быстротока по данным замера вычисленное A (таблица 11) оказалось близким в среднем к 37; уменьшения A и следовало здесь ожидать с увеличением шероховатости.

На рис. 34 совершенно отчетливо видна необходимость нового значения для A . На рис. 35 произведено сравнение замеренных величин скорости с вычислениями по 1-му и 2-му методам.

Надо отметить, что по методу Эренбергера нельзя строить кривых подпора и спада, так как даваемые им формулы пригодны лишь для равномерного течения; это является недостатком 2-го метода.

Рис. 36 показывает зависимость водосодержания β от уклона и гидравлического радиуса. Несмотря на некоторую разбросанность точек, эриванские наблюдения приводят к одинаковым с Эренбергером выводам: значительное падение β с ростом уклона и незначительное с ростом гидравлического радиуса. На рис. 37 нанесено водосодержание β в зависимости от скорости. Определенно видно, что воздухопоглощение начинается (β становится меньше единицы) при скоростях 3,5—4,5 м/сек, что удовлетворительно совпадает с даваемой Эренбергером границей в 3—4 м/сек.

Что касается вычисления β , то формула (2) Эренбергера применительно к Эриванскому быстротоку дает несколько иной численный коэффициент B .

В таблице 12 этот коэффициент подсчитан для разных участков; в среднем он равен не 0,40, а 0,45. На рис. 36 и 37 нанесены для сравнения кривые Эренбергера с последним значением коэффициента B .

В общем рис. 34—37 указывают, на основании эриванских опытов, на пригодность формул (1) и (2) Эренбергера и к эриванским условиям при условии указанного изменения числовых множителей A и B . Значительные отклонения замеров от вычислений без особого труда могут быть объяснены. Так, две точки на рис. 36 с $R=0,206$ и $0,183$ относятся к нижнему короткому расширяющемуся участку, где β могло еще не установиться. Что касается трех нижних точек на том же рисунке при $R=0,30$, то на переломе при переходе от участков 13—11 с меньшим уклоном на участок 11—9 с большим можем ожидать стремление струи отстать от дна, образовать вакуум и засосать больше воздуха.

Интересен вопрос о влиянии шероховатости стенок на воздухопоглощение. Предположение, что шероховатость увеличивает последнее и уменьшает β , сравнением венских и эриванских исследований не подтверждается: для формулы (2) Эренбергер при деревянном лотке получил $B=0,40$, а мы для более шероховатого эриванского имеем $B=0,45$, т. е. не уменьшение, а даже как бы увеличение водосодержания.

Возвращаясь к рекомендации отношения $\frac{n_1}{n_2}$, мы считаем возможным при расчетах брать его при $I=0,1—0,2$ равным 0,75 (по данным Эренбергера), при $I=0,2—0,4$, равным 0,75—0,50 (по эриванским данным), при $I=0,4$ и выше равным 0,50—0,30.

Добавим еще здесь, что второй метод расчета быстротока, именно Эренбергера, может быть перестроен так. В уравнение

$$v_1 = \frac{Q_1}{\omega_2 \beta}$$

подставляем v_1 из (1) и β из (2) (или соответственно из (3) при большем уклоне), после чего получаем:

$$\frac{Q_1}{AB \sin \alpha^{0,14}} = \omega_2 R_2^{0,47}.$$

Таблица 12

Вычисление водосодержания β

№ сечений	v_1	I	R_2	β	B
17	11,30	0,464	0,202	0,587	0,445
13	10,40		0,169	0,572	0,430
	10,85		0,235	0,535	0,380
11	9,40	0,364	0,165	0,680	0,480
	6,32		0,102	0,568	0,390
	11,30		0,190	0,678	0,445
9	9,50	0,273	0,151	0,771	0,500
	6,15		0,087	0,726	0,460
	10,55		0,216	0,630	0,423
8	9,60	0,287	0,165	0,710	0,470
	5,90		0,094	0,694	0,447
	10,14		0,207	0,686	0,450
6	9,25	0,259	0,150	0,796	0,510
	5,71		0,087	0,790	0,494
	9,00		0,195	0,808	0,460
3	7,90	0,162	0,156	0,873	0,495
	4,85		0,082	0,945	0,518
	7,00		0,183	0,704	0,332
1	5,37	0,076	0,133	0,946	0,440
	3,20		0,073	1,000	0,450
	9,55		0,203	0,744	0,227
	3,40	0,0172	0,168	1,000	0,317
	1,72		0,120	1,000	0,312

Здесь справа имеем обычно искомые величины. Уравнение может быть решено подбором.

Значение AB для быстотоков, аналогичных Венскому $55 \cdot 0,40 = 22$, а для аналогичных Эриванскому $37 \cdot 0,45 = 16,7$; для Боровенского быстотока AB получилось равным 13,9 (таблица 9); если принять $B = 0,40 - 0,45$, то получится $A = 31 - 35$.

Все наши данные относятся к углам наклона до $\alpha = 45^\circ$ и до $R = 0,3$ м.

Новые исследования быстотоков должны были быть поставлены: 1) на быстотоках крупных поперечных профилей и гидравлических радиусов; 2) на быстотоках со стенками разных шероховатостей. По-

следние исследования должны метод Эренбергера уточнить, дав ответы на вопросы: 1) зависят ли водосодержание β и коэффициент B от шероховатости, 2) как зависит от последней скорость v_1 и как увязываются между собой коэффициенты n_1 и A . Для нашего метода исследования должны уточнить зависимость отношения $\frac{n_1}{n_2}$ от уклона.

В качестве последних замечаний по Эриванскому быстротоку сообщаем, что при почти непрерывной работе его в течение четырех лет при средних скоростях в 5—6 м/сек (большие скорости на нем случались редко) и при значительном количестве наносов он оказался очень прочным на размывание. При осмотре обнаружены лишь незначительные вымывы цементного раствора в швах кладки и то только в некоторых местах верхней, наиболее крутой части быстротока.



Рис. 38. Пропуск шуги и льда по быстротоку.

- | | |
|--|---|
| а) для лотков из дерева — от 15 до 23 м/сек | } Вместо обычно рекомендуемых для данных материалов от 5 до 8 м/сек |
| б) из бутовой кладки — от 12 до 20 м/сек | |
| в) из бетона — от 10 до 18 м/сек | |

причем верхний предел следует брать при периодической работе и при редком пропуске расчетного расхода, а нижний при непрерывной работе лотка, при частом пропуске расходов, близких к предельному.

1) См. Гидравлический справочник Павловского И. Н. — Нормы для проектирования гидравлических сооружений и т. д.

Отметим еще здесь, что в зимнее время Эриванский быстроток несет шугу; пропуск ее затруднителен, она нарастает большими комьями, отчего ее приходится проталкивать шестами (рис. 39).

Вход в быстроток несимметричен к его оси; из-за этого в верхней его части получается зигзагообразное движение струи в плане с разными глубинами у берегов. Такого входа не следует проектировать во избежание излишнего повышения стенок или выбрасывания струи из лотка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Нельзя требовать от полевого исследования одного быстротока результатов, достаточных для выяснения явлений в быстротоках вообще и закрепления их в виде формул. Для этого работающий быстроток не дает ни достаточного разнообразия явлений, ни достаточной чистоты их; в полевых условиях невозможны ни точность лабораторных замеров, ни их неспешность и повторность.

Однако данные исследования не только установили общую картину явления, не только проверили установленные лабораторно формулы, но и расширили их область применения при вновь установленных коэффициентах и даже дали новый метод расчета. Дальнейшее изучение явлений в быстротоках должно, конечно, продолжаться и в лабораториях и в натуре; уже выстроенные и вновь строящиеся быстротокки дают для этого поводы и возможности, а то, что нам теперь уже известно о движении воды в них, указывает нам, что, как и зачем в них должно быть исследовано.

А. А. Ничипорович.

ИСПЫТАНИЕ ТУРБИН И РЕГУЛЯТОРОВ БОЗ-СУЙСКОЙ ГИДРОСТАНЦИИ.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Мы слишком мало знаем наши гидроэлектрические станции и недостаточно изучаем опыт их постройки. В частности описания Боз-Суйской гидростанции разбросаны и отрывочны. Автор дает нам в первой части своей работы связное, наглядное и достаточно полное описание с чертежами и фотографиями. Во второй он излагает исследования турбин и регуляторов станции, произведенные по поручению Ташгэс-трама. Цель этих исследований была в первую очередь эксплуатационная — выяснить влияние на работу турбин подпруды от недостаточной пропускной способности отводного канала, каким является нижний бьеф самого арыка Боз-Су. Из-за этой подпруды напор гидростанции никогда не достигает проектного, и турбины снижают и свою мощность и свой коэффициент полезного действия.

Из методов испытаний интересен замер расхода одновременной работой ряда вертушек на передвижной раме. Этот способ в СССР впервые был применен шведскими инженерами при испытании турбин Волховской гидростанции. Вероятно данный замер был вторым его применением. С тех пор он применялся секцией исследования гидро-станций Института уже несколько раз (в Сызрани и Земоанчалах) и всегда с успехом.

Если несколько лет назад в исследовательских институтах СССР еще не было навыков в ответственных испытаниях турбин (что и вызвало в указанном случае приглашение иностранцев), то теперь такие исследования производятся собственными силами; производство таких исследований не встречает затруднений ни в методике, ни в квалифицированных сотрудниках, ни в приборах и в большинстве случаев происходит в условиях более или менее стандартных.

Данные исследования были одними из первых в Союзе и, естественно, не свободны от некоторых недостатков, вскрываемых самим автором; тем не менее они представляют большой интерес в отношении методики, и не только для гидротехников, но и для турбиностроителей.

Дирекция Института „Водгео“

1. ВВЕДЕНИЕ.

В 1929/30 г. гидротехнический сектор б. Гидротехгеонинститута (в то время Государственного института сооружений Союзстроя ВСНХ СССР) по заданию Капырьястроя и Ташгэстрома провел ряд исследований отдельных сооружений Боз-Суйской гидростанции для использования полученных данных как при проектировании и сооружении Кадырьинской гидростанции, так и для освещения ряда вопросов, важных вообще для гидростроительства. Так, были проведены исследовательские работы по изучению явлений фильтрации через лессовую дамбу и прилегающие к ней лессовые массивы ¹⁾, по выяснению картины заиливания водохранилища ²⁾ (с использованием этих данных для освещения вопроса о наносах, влекомых арыком Боз-Су), по испытанию турбин и регуляторов; предполагалось также провести исследование работы многоступенчатого перепада, фильтрации под перепадом и т. д.

Настоящая статья содержит в себе описание работы по испытанию турбин и регуляторов Боз-Суйской ГЭС, которая была проведена по заданию Ташгэстрома в июле 1930 г. под руководством автора статьи исследовательской партией Института в составе сотрудников института Костомарова В. М. и Попова И. И. Этой же партией была проведена и вся обработка полученных материалов.

Наряду с описанием указанных работ в первой части настоящей статьи дано краткое описание Боз-Суйской ГЭС и ее отдельных сооружений, знакомство с которыми считаем весьма полезным для широкого круга гидротехников.

2. ГИДРОСТАНЦИЯ НА АРЫКЕ БОЗ-СУ БЛИЗ ТАШКЕНТА

Боз-Суйская гидростанция, постройка которой началась в 1924 г. и закончилась в 1926 г., расположена на ар. Боз-Су (на 1 км выше железнодорожного моста) близ Ташкента. Ар. Боз-Су, представляющий собой древнетуземный арык, со временем превратившийся в водоток, вполне схожий с естественным, берет свое начало из р. Чирчик (рис. 1), являющейся притоком р. Сыр-Дарьи. Реку Чирчик можно характеризовать как реку ледникового питания, так как она образуется из основных притоков — горных р. Чаткал, Пскем и Угам, которые в свою очередь берут свое начало преимущественно из ледников Чаткальского и Александрийского горных хребтов. Расходы воды в р. Чирчик колеблются примерно от 100 до 1000 м³/сек. Максимальный замеренный расход воды в р. Чирчик был 1452 м³/сек (31 мая 1914 г.), минимальный — 30 м³/сек (9 февраля 1918 г.) В ар. Боз-Су вода из р. Чирчик забирается при помощи габионного полуинженерного головного сооружения (рис. 2), состоящего из: 1) габионных порогов, перегораживающих все притоки русла р. Чирчик, 2) направляющих дамб, 3) габионных водосливов и габионного барража.

¹⁾ В кратком изложении см. „Гидротехническое строительство“, № 6, 1933 г.

²⁾ См. Сообщение Государственного института сооружений, № 23, 1931 г. Ничипорович, Почарский — Исследование режима наносов ар. Боз-Су.

Все указанные сооружения рассчитаны таким образом, чтобы при малом расходе в р. Чирчике, можно было захватывать в ар. Боз-Су до 50% всего расхода, а при большом расходе — захватывать не больше $270 \text{ м}^3/\text{сек}$, на каковой расход и рассчитаны все сбросные сооружения, расположенные ниже по ар. Боз-Су. Ниже головного сооружения по ар. Боз-Су расположен ряд регуляторов: водосливные туземного типа — Юмалык и Гальбрек и один инженерного типа с железными щитовыми затворами — Юмалак-Тепе (рис. 3). При малых расходах в р. Чирчик является необходимым производство полного закрытия временными карабурными перемычками как водосливов (габионных порогов) в русле р. Чирчик, так и сбросных водосливов по ар. Боз-Су, а также и закрытия полностью щитовых отверстий Юмалак-Тепинского сброса. Ниже регулятора Юмалак-Тепе русло ар. Боз-Су представляет собой водоток с довольно большими скоростями течения от 1,5 до 2,0 м/сек, с резко меняющимися уклонами дна от $I = 0,0065$ до $I = 0,021$. Средний уклон от головы до Боз-Суйской ГЭС (на протяжении 30 км) $I = 0,0037$. На всем протяжении от головы до Ташкента



Рис. 1. Р. Чирчик.

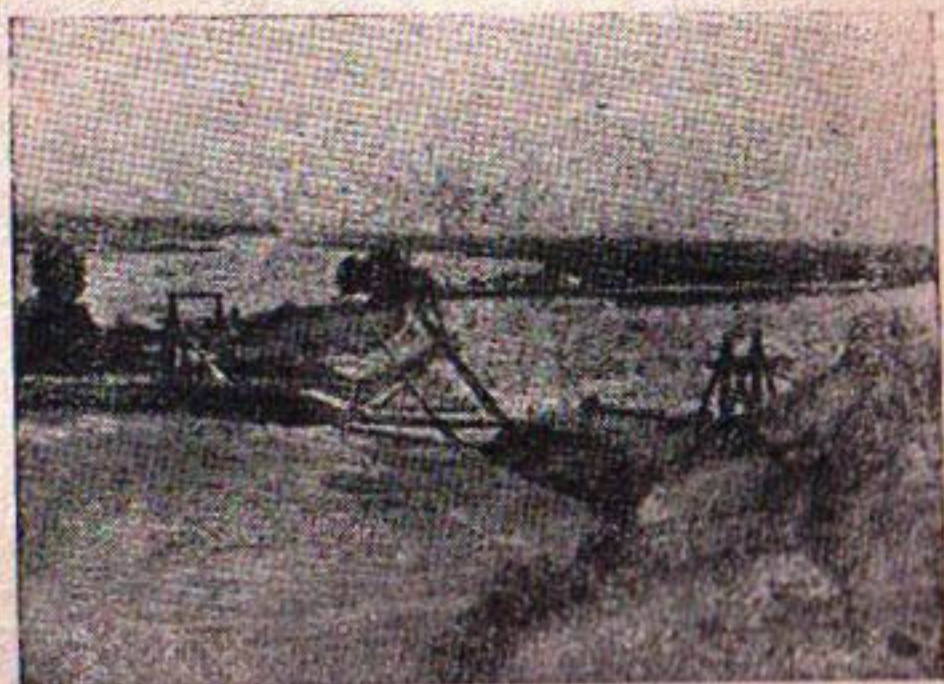


Рис. 2. Головное сооружение ар. Боз-Су.

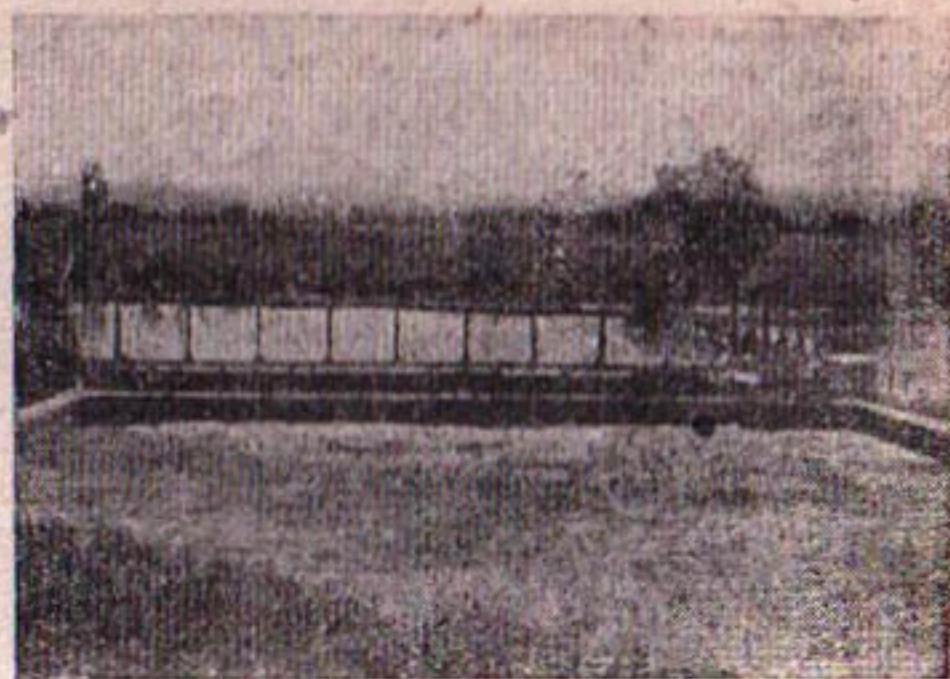
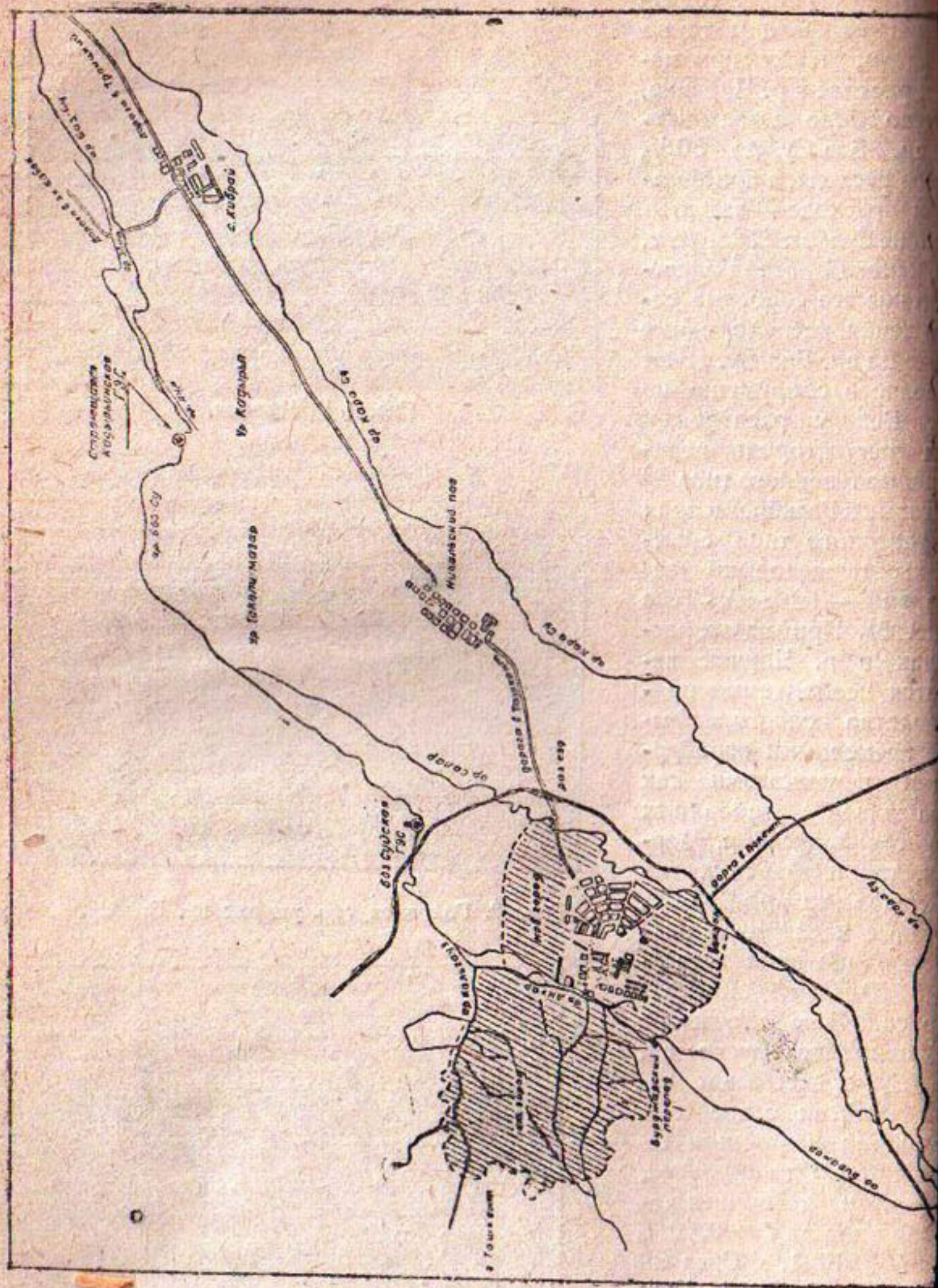


Рис. 3. Регулятор Юмалак-Тепе.



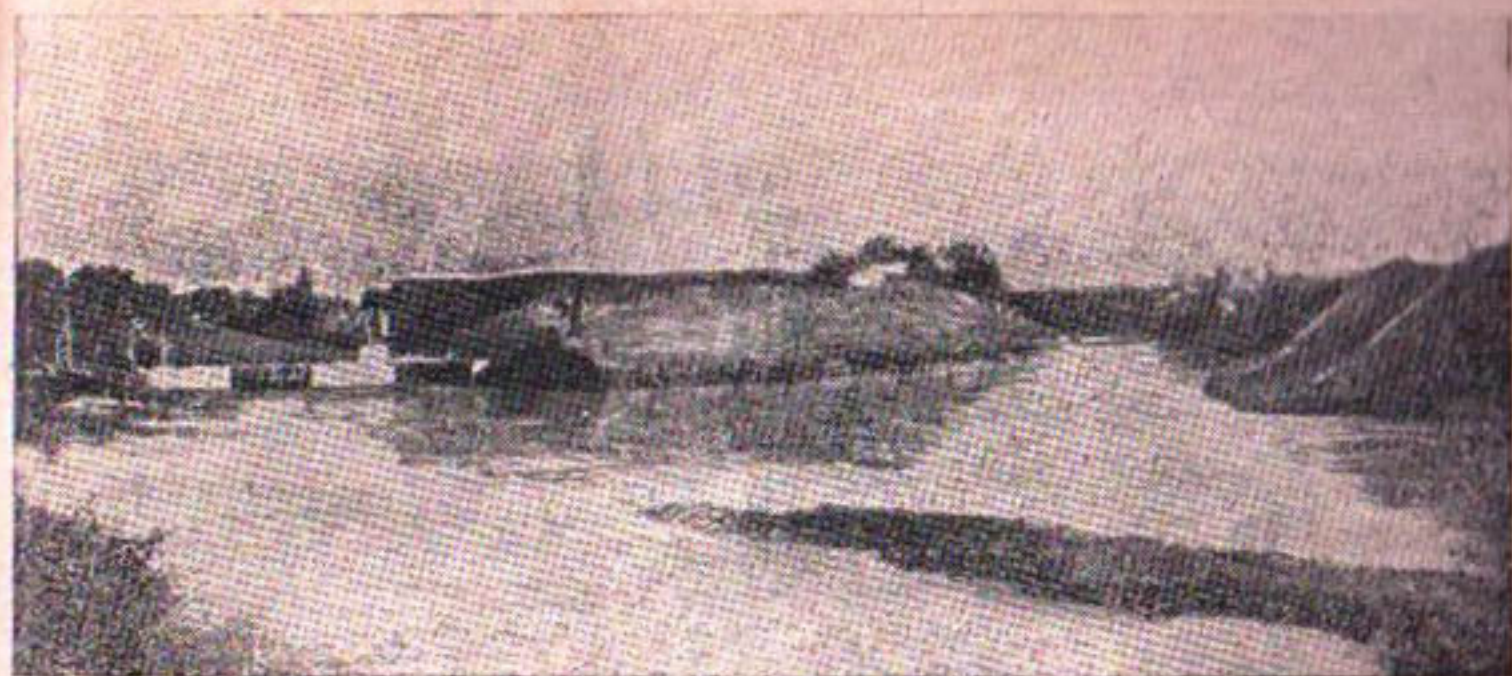


Рис. 5. Головное сооружение ар. Салар.

(в 30 км) (рис. 4) от ар. Боз-Су отходит много мелких оросительных каналов с самыми примитивными заборными сооружениями, не считая ар. Салара, в голове которого имеется заборное сооружение инженерного типа с пропускной способностью в $30 \text{ м}^3/\text{сек}$. Заборное сооружение ар. Салар (рис. 5, 6) расположено на 6 км выше Боз-Суйской ГЭС и частично обслуживает также и ГЭС, так как при помощи этого сооружения регулируется расход воды, поступающей на ГЭС; в зимнее время через особо выстроенный деревянный лоток-шугосброс сбрасывается шуга, чтобы не дать ей возможность пройти к гидростанции и тем самым нарушать ее нормальную работу. На 4 км ниже существующей ГЭС ар. Боз-Су делится на 2 крупных арыка: Анхор и Колькауз, которые



Рис. 6. Шугосброс.



Рис. 7. Ар. Боз Су.



Рис. 8. План сооружений,

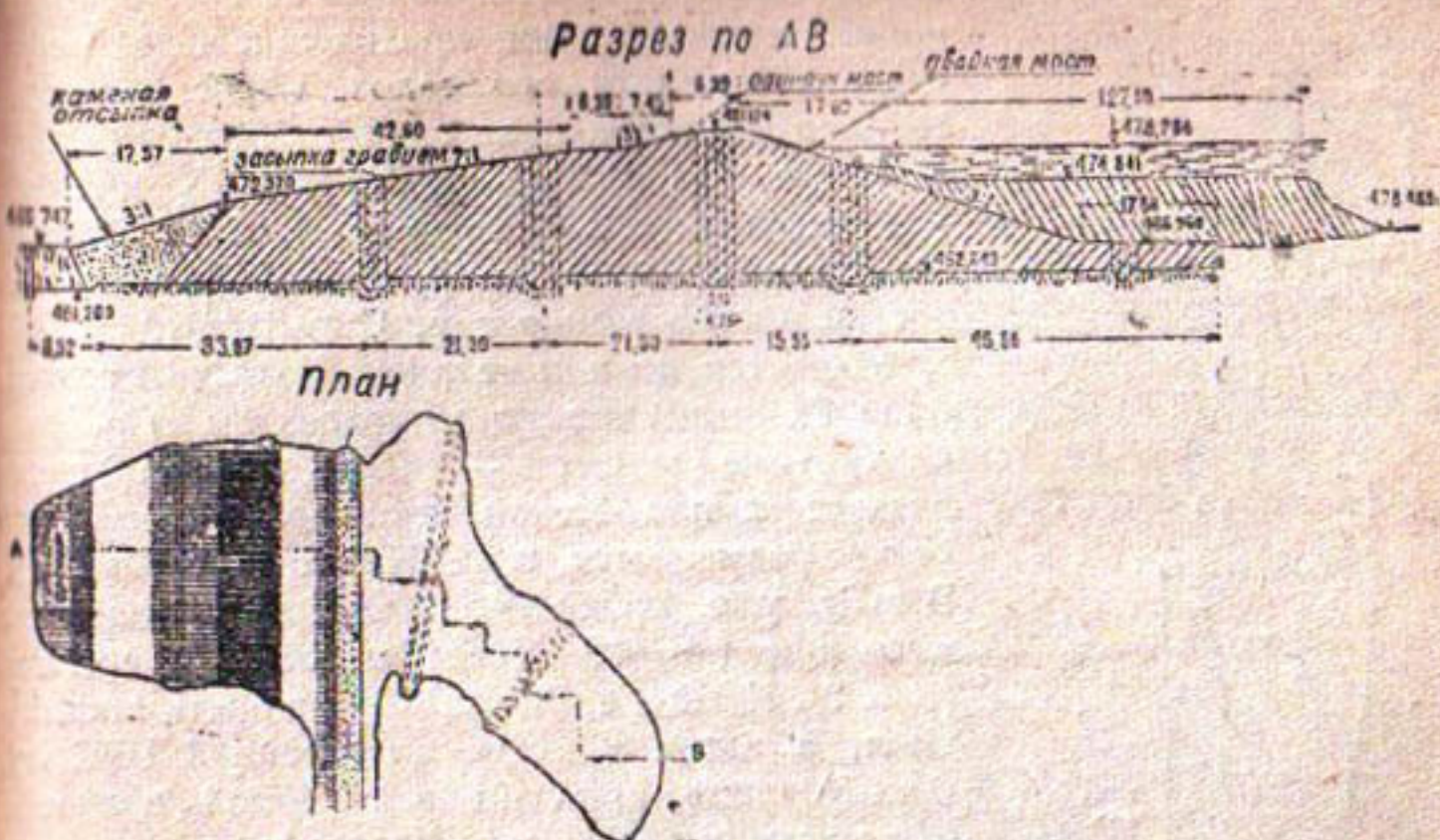


Рис. 9. Земляная плотина.



Рис. 10. Земляная плотина (вид со стороны верхнего бьефа).

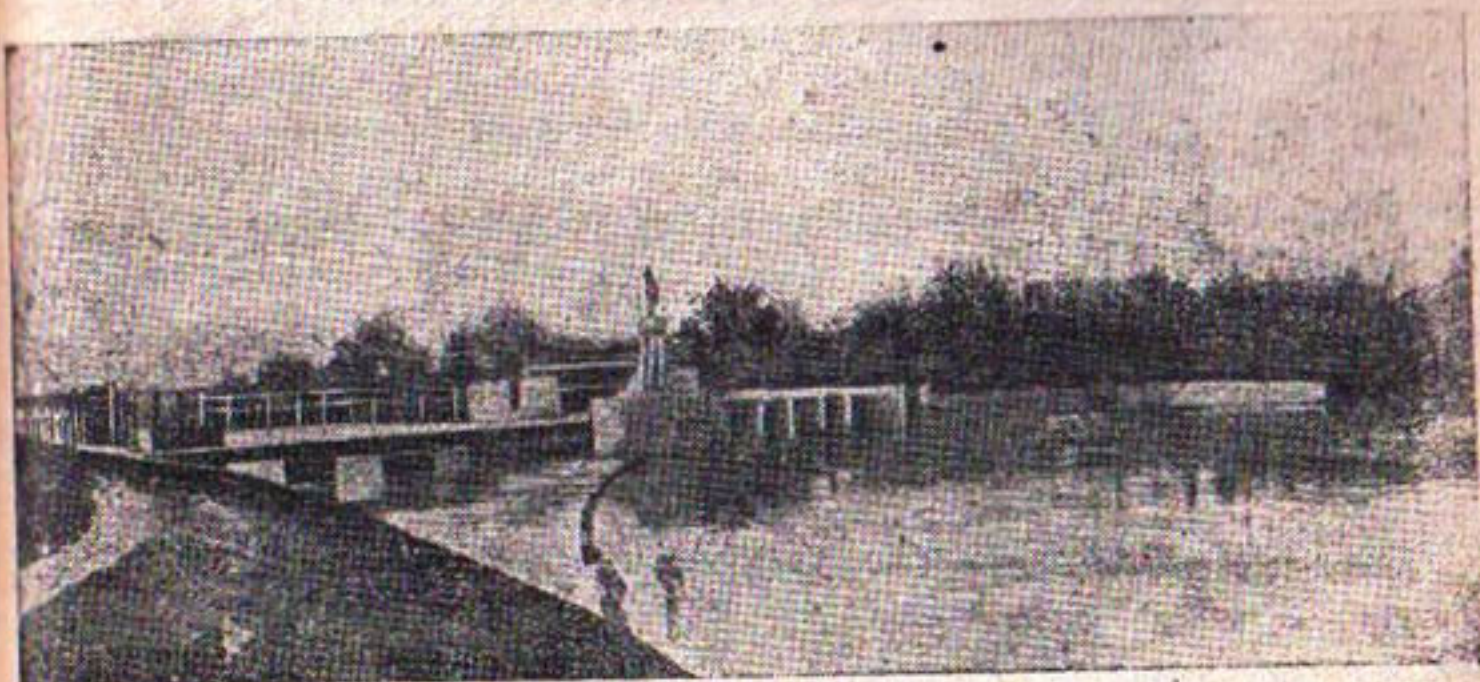


Рис. 11. Сбросные и водозаборные сооружения.

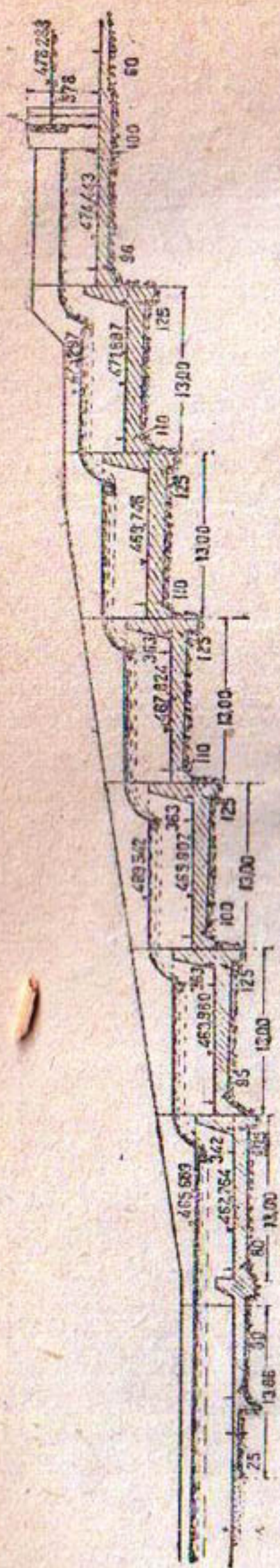


Рис. 12. Перепал.

в свою очередь делятся на мелкие и мельчайшие ирригационные арыки, проходящие через район старого города и его садов. Сбросные ирригационные и грунтовые воды собираются опять в общее русло Боз-Су, но Боз-Су нижний уровень которого больше чем на 60 м ниже верхнего Боз-Су. Нижний Боз-Су дальше впадает непосредственно в р. Сыр-Дарью.

Характер долины верхнего Боз-Су от головы и до Ташкента (попутно с удалением от р. Чирчика) тоже меняется — низкие пологи берега вначале на протяжении нескольких километров резко повышаются и на 15 км от головы ар. Боз-Су уже проходят в глубокой долине с высокими (до 40 м) обрывистыми берегами (рис. 7). Ниже к ар. Салар берега опять понижаются, а затем к месту выстроенной ГЭС ар. Боз-Су опять проходит в глубокой долине с обрывистыми берегами. Берега и склоны ар. Боз-Су от головы до гидростанции сложены суглинками и подстилающими их галечниками и рыхлыми конгломератами, причем мощность суглинков по длине сильно колеблется.

Боз-Суйская гидростанция, вступившая в эксплуатацию 1 мая 1926 г., расположена на линии, спрямляющей одну из многочисленных петель ар. Боз-Су на 1 км выше железнодорожного моста Ташкента (рис. 8).

Здесь ар. Боз-Су прегражден земляной плотиной (рис. 9, 10) из лессового грунта, наибольшая высота которой от подошвы котловины 20 м, с шириной по верху 6,4 м и длиной по основанию 100 м. С низовой стороны указанная дамба имеет каменную отсыпку, в основании которой проложены дренажные трубы, по которым фильтрующая через дамбу вода собирается в общий железобетонный колодезь, откуда откачивается периодически насосом, который включается и выключается автоматически¹⁾. Откосы дамбы следующие: мокрый откос 2 1/2:1 и 3:1, сухой откос 3 1/2:1 и 7:1. В верховой части плотины произведена подсыпка (засыпка русла ар. Боз-Су) на длину 128 м до отметки 474,841, при нормальной отметке воды верхнего бьефа 478,675. Сопряжение тела плотины с

¹⁾ В марте 1932 г. насос был снят и воду начали отводить самотеком.

естественным грунтом в основании и берегах выполнено при помощи пубьев глубиной 2,00 м.

На время работ по постройке плотины вода ар. Боз-Су (до 20 — 30 м³/сек) отводилась через тоннель длиной 170 м и устроенный в нем деревянный лоток. Размеры тоннеля следующие: ширина 5 м и высота 4 м при толщине грунта в кровле тоннеля около 4 — 5 м. В процессе работ тоннель был на большом протяжении раскрыт сверху и обращен в открытый прокоп. После постройки плотины прокоп был в верхней своей части плотно заделан лессовым грунтом.

Благодаря искусственному преграждению русла ар. Боз-Су и поднятию горизонта воды с отметки примерно 466,00 до отметки 478,29 образовалось водохранилище общей емкостью 1 650 000 м³, и подпор распространился вверх по ар. Боз-Су до головного сооружения ар. Салар (5,5 км).

Направо от дамбы, по линии, спрямляющей петлю, расположены заборные и сбросные сооружения станции (рис. 11).

Водосброс — многоступенчатый железобетонный перепад (рис. 12, 12а) имеет в голове 6 щитовых донных отверстий размером 1,5×2,0 м (рис. 18), с заложением порога на 3,8 м ниже нормального горизонта воды верхнего бьефа (отм. 478,29), перекрываемых металлическими щитами с ручным подъемом.

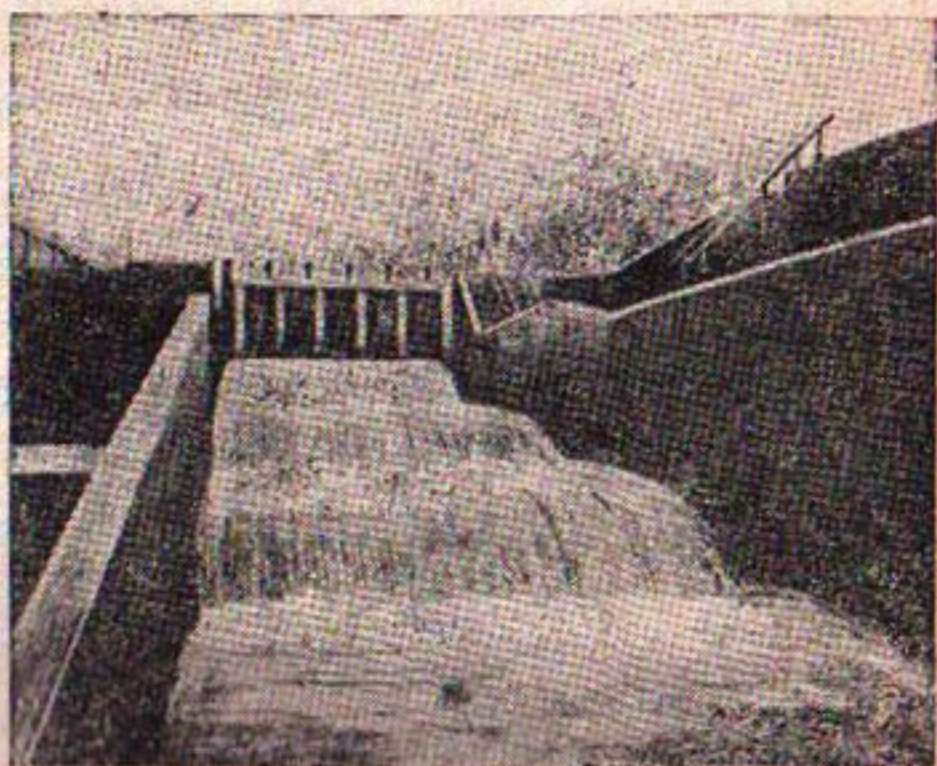


Рис. 12-а. Перепад (вид снизу вверх).

По обеим сторонам щитовых отверстий на случай внезапного повышения уровня воды верхнего бьефа имеются два сифонные сброса (рис. 14) с шириной по гребню 2 м каждый. Верхняя кромка сифонного водослива имеет отметку 478,29.

Следует отметить, что при эксплуатации этих сифонов был обнаружен ряд дефектов, нарушающих нормальную работу всей станции; так например: включаясь при незначительном повышении (на 6—8 см) горизонта воды в верхнем бьефе, они благодаря своей несовершенной конструкции долго не включаются, срабатывая горизонт воды в водохранилище ниже гребня на 15—16 см и тем самым сбрасывая значительное количество рабочей воды. При частых же колебаниях горизонта верхнего бьефа вследствие колебания нагрузки становится необходимым или держать его на отметке значительно ниже водосливной кромки сифонов или итти на довольно частые сбросы значительного количества воды вхолостую. Излишние хлопоты причиняет также и постоянное обмерзание воздушного отверстия в зимнее время.

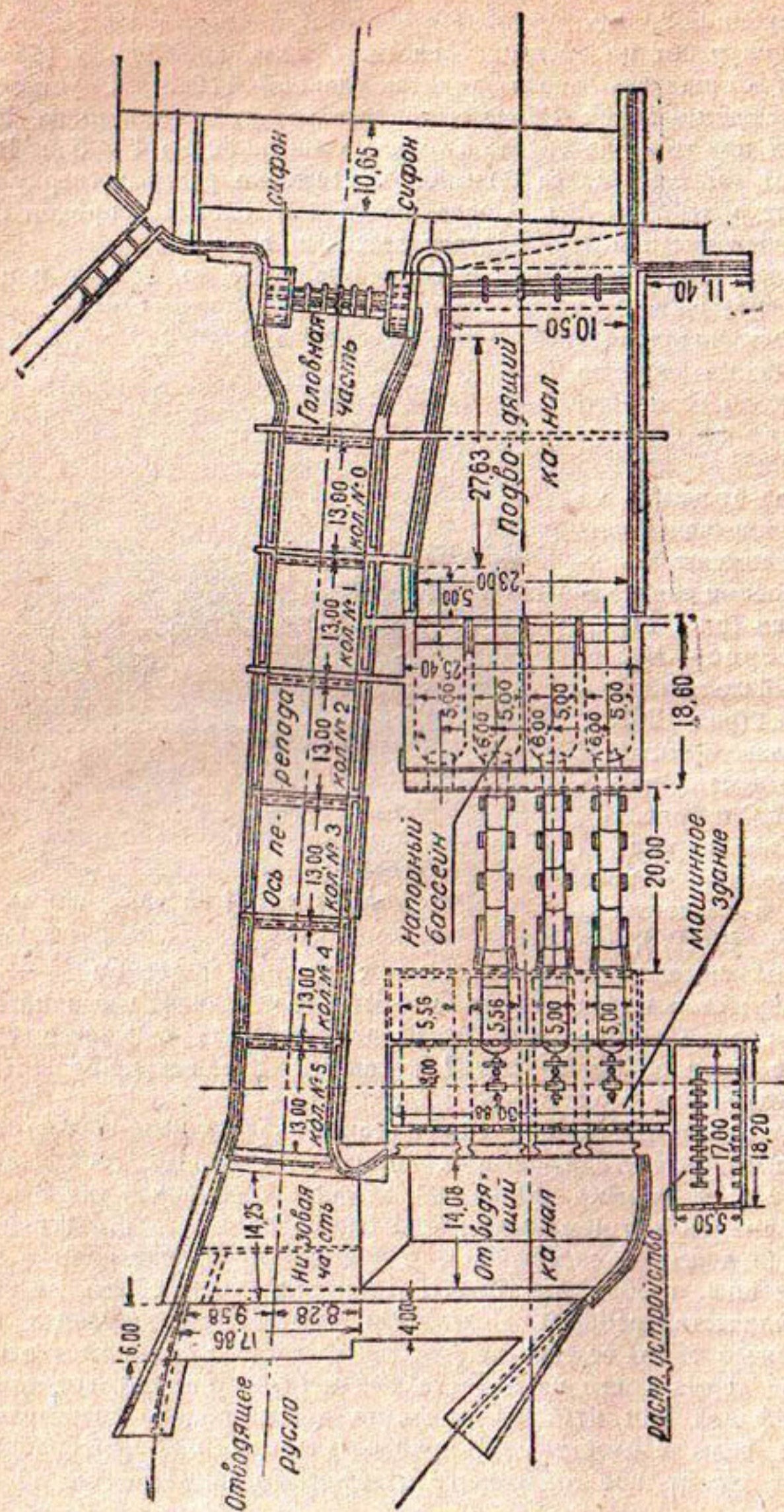


Рис. 13. План заборных и водосборных сооружений.

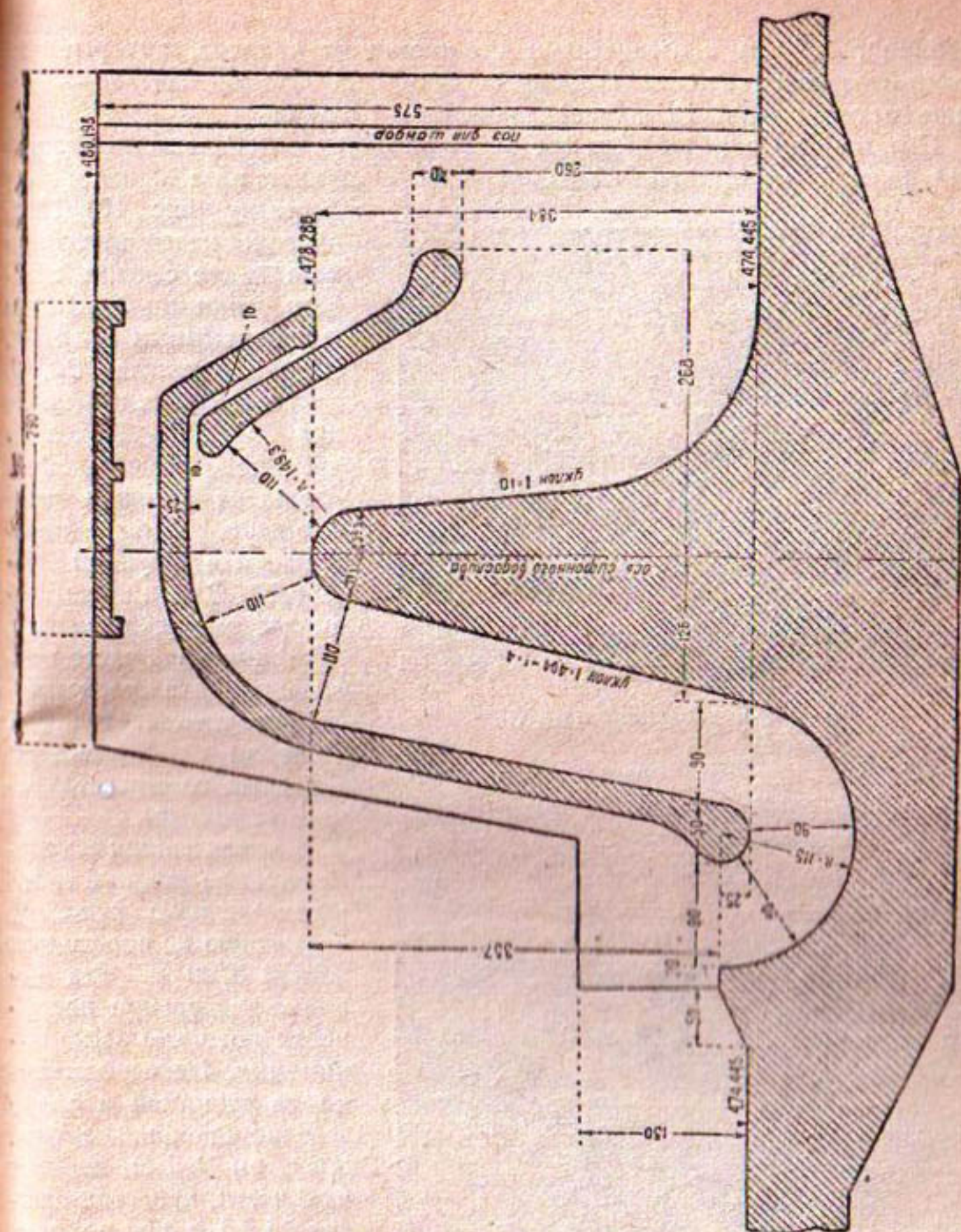


Рис. 14. Сифонный водослив.

В силу указанного станция решила эти сифоны закрыть шандорами; последнее сделать не удалось из-за плохого состояния шандорных пазов и невозможности опустить шандоры до дна ¹⁾.

Общая пропускная способность водосброса примерно равна $50 \text{ м}^3/\text{сек.}$ В средней своей части перепад шириной $9,30 \text{ м}$ общей длиной 67 м имеет 7 ступеней. На каждой ступени имеется водобойный колодец

¹⁾ Благодаря такой неудаче с сифонами на Боз-Суйской ГЭС решили от них отказаться и при проектировании Кадырьинской гидроэлектростанции.

глубиной, 1,70 м, с отверстиями для чистки от наносов, которые там могут отлагаться. Высота каждой ступени 2 м. Общее падение — разность отметок верхнего и нижнего бьефа — 12,75 м.

Параллельно с водосбросом с левой стороны расположен подводящий канал, в который из водохранилища поступает вода к напорному

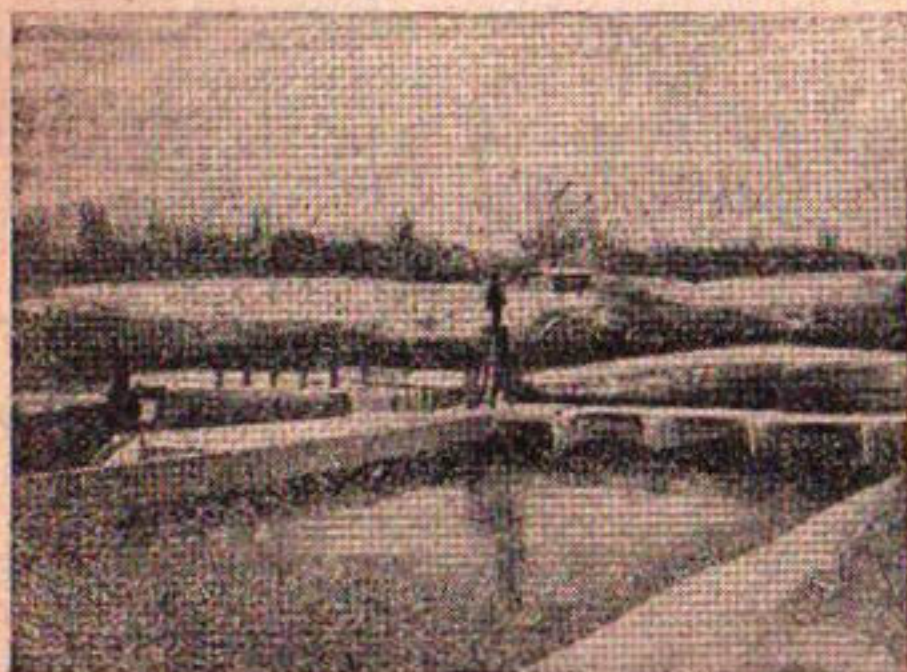


Рис. 15. Подводящий канал.

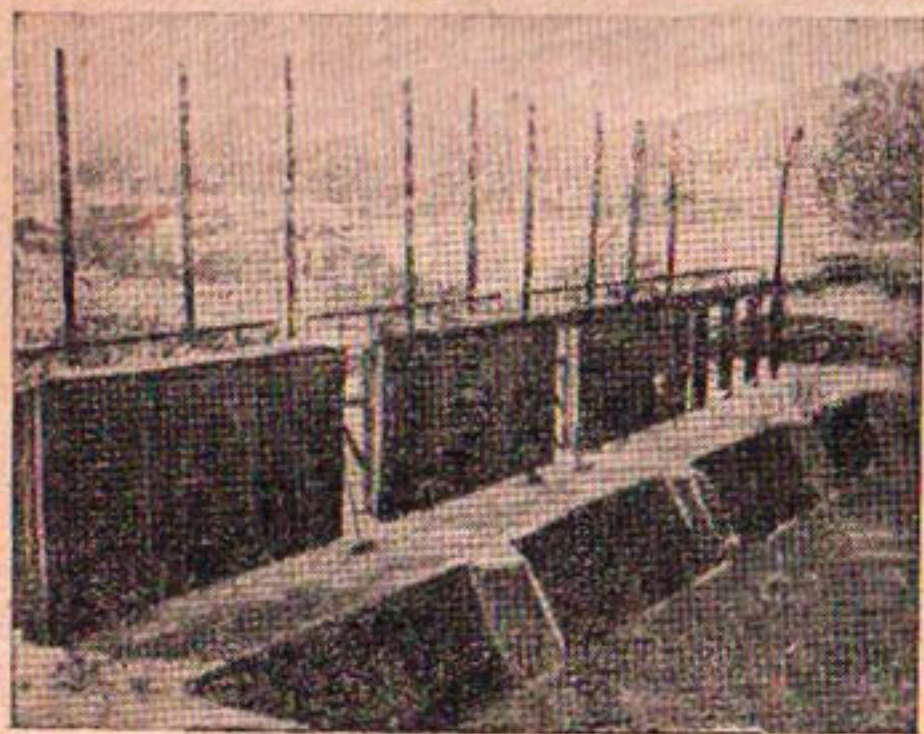


Рис. 16. Щитовые затворы.

бассейну (рис. 15). Подводящий канал имеет прямоугольное сечение с железобетонными стенами и горизонтальным дном. Ширина канала 23,00 м, длина его 40 м и отметка дна 473,92. Выходная часть подводящего канала разделена бычками на 6 пролетов, которые перекрываются крупной решеткой. Бычки имеют пазы для закладки шандор.

В конечной части подводящий канал разделяется тремя железобетонными стенками на 4 отдельные для каждого агрегата напорные камеры.

Каждая напорная камера имеет во входной своей части мелкую решетку, состоящую из полосового железа 8/90 м. Эта решетка может при необходимости довольно легко выниматься. Непосредственно за решеткой входное сечение напорной камеры, пролетом 4,5 м, делится на 3 части, пролетом каждая в 1,53 м, при помощи железных стоек (двухтавровых балок), нижним концом заделанных в бе-

тонный пол, а верхним — опирающихся на горизонтальную тавровую балку. Пролеты перекрываются тремя металлическими щитами скользящего трения с подъемом вручную (рис. 16). Перед щитовыми отверстиями на 1,20 м ближе к решеткам пролет также разделяется двумя металлическими стойками, но уже для закладки шандор. За щитами дно напорной камеры по кривой понижается с отметкой 474,986 до отметки 470,466 и в конце ограничивается массивной железобетонной стеной (рис. 17). К этой стенке

примыкают железные клепаные трубопроводы, подводящие воду к турбинам. Каждый трубопровод диаметром 2400 мм имеет длину 20 м (рис. 18) при толщине стенок $\delta = 3/8"$. Соединение отдельных склепанных колец осуществлено при помощи фланцев; на всем протяжении трубопровода (через 1438 мм) имеются ребра жесткости ($\angle 90 \times 90 \times 12$). Компенсаторов не имеется, угол наклона оси трубопровода к горизонту равен 14° .

В стенку напорной камеры каждый трубопровод заделан при помощи никерных ребер ($\angle 100 \times 100 \times 12$).

Опоры трубопровода — бетонные, поставленные через 2,70 м. Вес трубопровода примерно 82 200 кг. Он изготовлен для всех турбин Ленинградским металлическим заводом.

В нижней своей части трубопровод имеет перелом (из наклонного положения в горизонтальное) и расширение с $D = 2400$ мм до $D_1 = 2984$ мм, к которому и присоединен кожух турбины, имеющий диаметр также $D = 2984$ мм и служащий как бы продолжением трубопровода.

Турбины (рис. 19 — см. в конце книги) все системы Френсиса, двойные, закрытые, котельного типа, с лобовым подводом воды, с двумя металлическими всасывающими трубами длиной 2,25 м каждая. Обе всасывающие трубы соединены между собой при помощи особой трубы для предотвращения осевых усилий, могущих возникнуть от неравномерности вакуума; кроме того эта труба при помощи особого приспособления может автоматически соединяться с атмосферным давлением при повышении числа оборотов турбины свыше 500 об/мин. Тип колеса — диагональный, без наружного обода, лопатки привертные (рис. 20). Подшипник гребенчатый с водяным охлаждением. Как видно из прилагае-

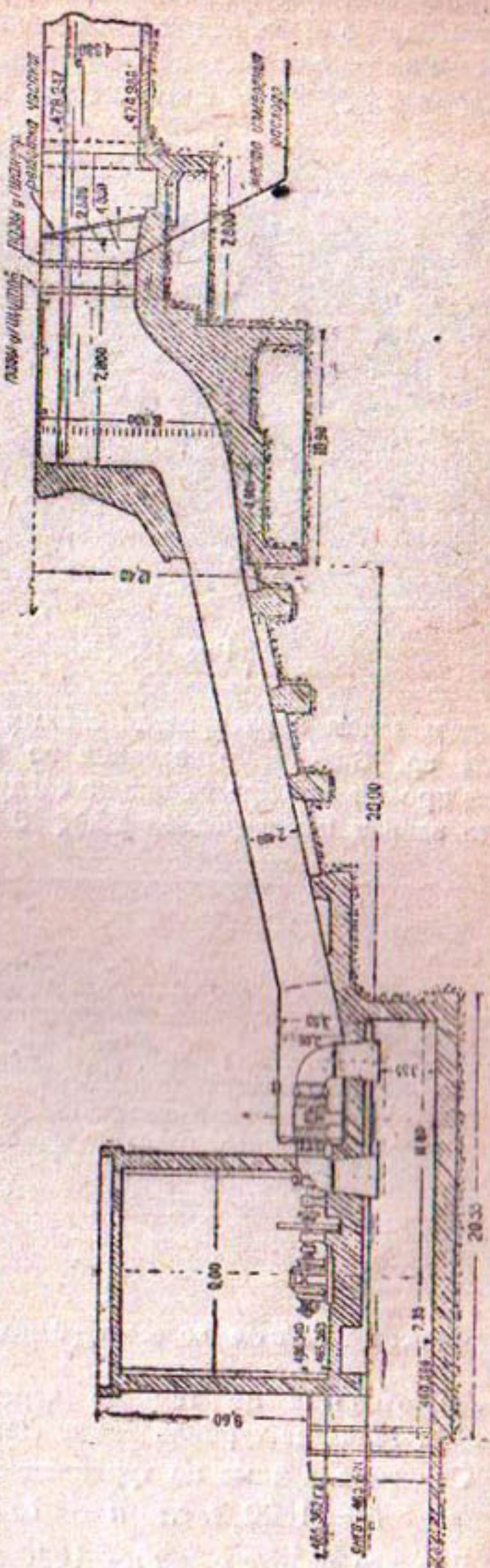


Рис. 17. Разрез по оси напорного трубопровода.

мых рисунков, вся турбина помещается вне машинного зала, за исключением одного из колен всасывающей трубы (рис. 21).

Вода из турбин поступает в турбинные прямоугольные каналы-колодцы размером $5 \times 3,25$ м и отводится в нижний бьеф. Здание станции с ма-

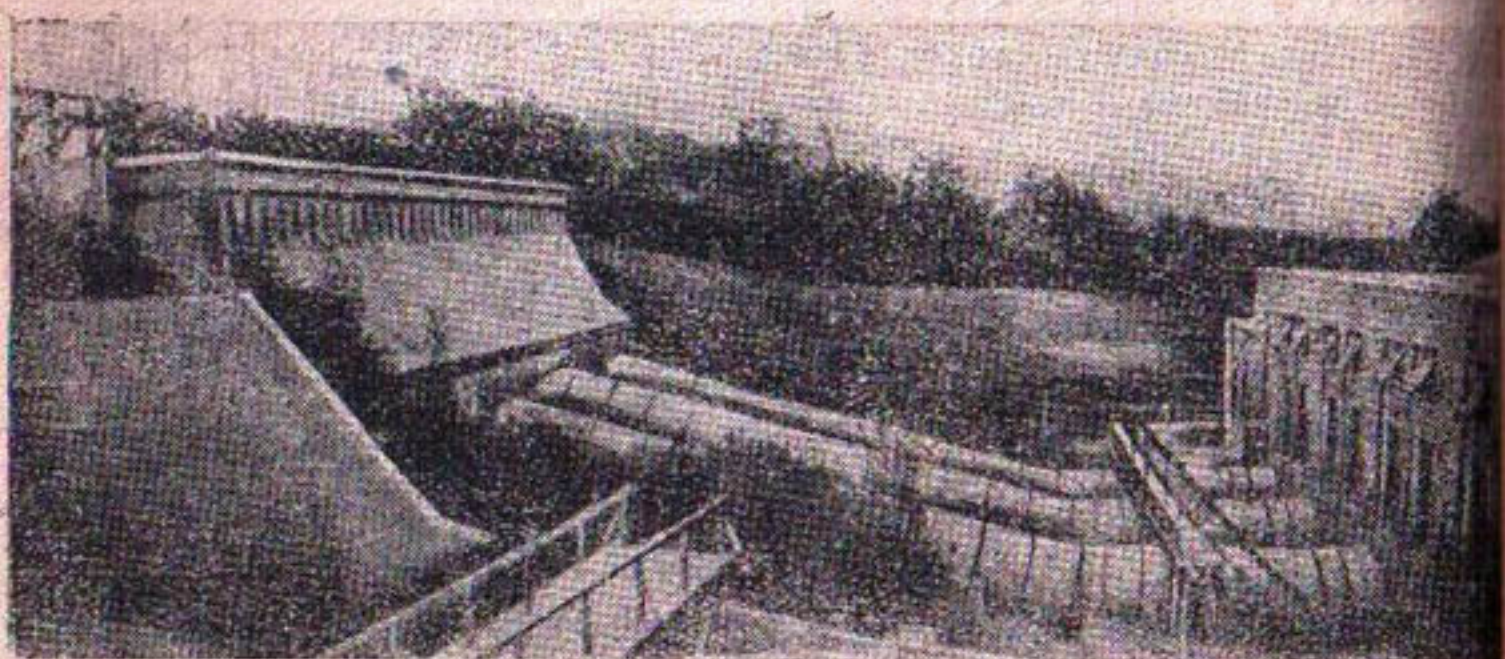


Рис. 18. Напорные трубопроводы.

шинным залом и распределительным устройством расположено в старом русле ар. Боз-Су, отведенном во время постройки из данной петли через прокоп по спрямлению до следующей петли. Фундаментная бетонная часть здания имеет размер 25×20 м, верхнее строение — $29 \times 9,8$ м.

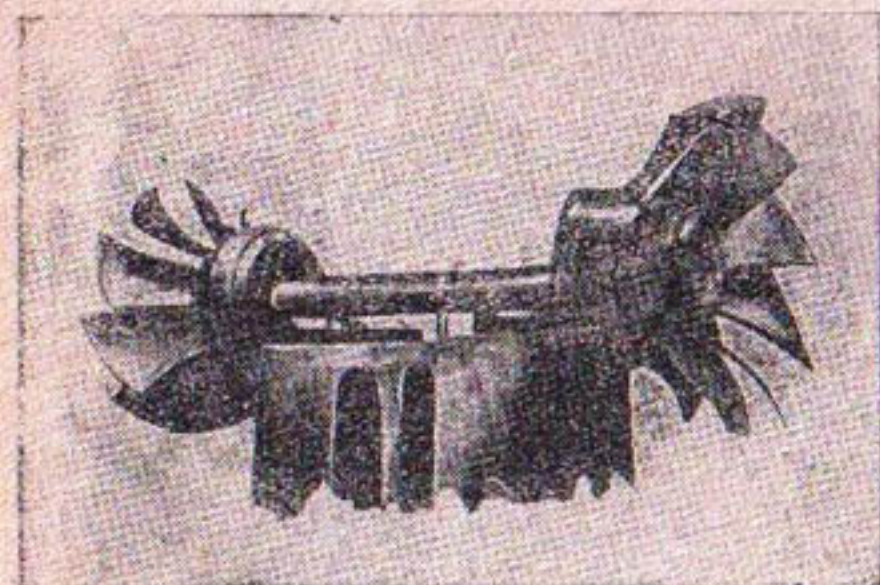


Рис. 20. Рабочее колесо турбины.

как изготовлена по тем же чертежам. На место 4-го агрегата в 1929 г. заказана турбина также Ленинградскому металлическому заводу.

Основные данные по турбинам следующие:

$$N=1500 \text{ л. с.}; \quad n=375 \text{ об/мин}; \quad H_{\text{н.тто}}=13,5 \text{ м.}$$

Диаметр рабочего колеса 1050 мм. Выходной диаметр всасывающей трубы 2000 мм.

Каждая турбина снабжена масляным автоматическим регулятором (рис. 22), допускающим установку числа оборотов от руки и с распределительного щита при помощи электромотора, с ограничителями хода и переключателем на ручное регулирование. Все регуляторы изготовлены заводом Neumeyer.

Примечание: При таком расположении турбин в результате холодных зим 1928/29 и 1929/30 гг. с морозами, доходившими до $29 - 25^{\circ}$, все трубки от приборов (манометра, термометра подшипника, трубы, соединяющей всасывающие трубы), замерзли и приходилось их утеплять специальными электрическими печами.

Гарантийных значений для первых трех турбин и регуляторов ни в каких документах найти не удалось; на запрос Ленинградский металлический завод сообщил, что гарантии к. п. д. для изготовленной им турбины он не давал, а согласно требованию заказчика изготовил тур-

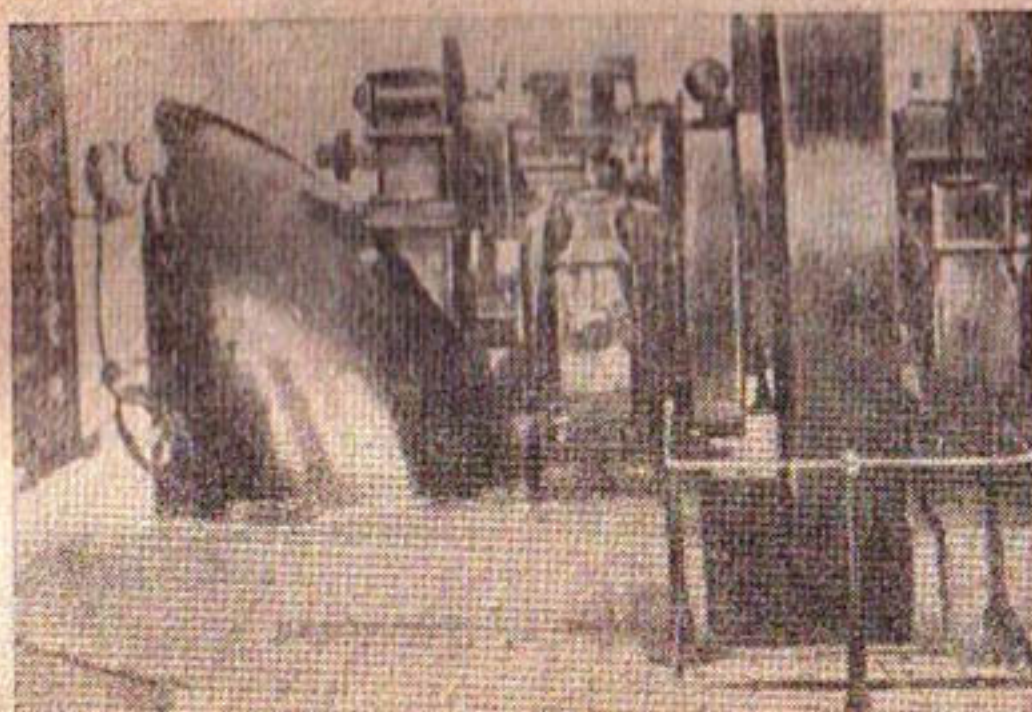


Рис. 21. Часть турбины, находящаяся в здании станции.

бину, идентичную турбинам завода Neumeyer, и рекомендовал пользоваться универсальной характеристикой колеса турбин Боровенской гидростанции¹⁾, тип которой тот же, что и для турбин Боз-Суйской ГЭС.

Рис. 23 представляет собой пересчитанную универсальную характеристику боровенского колеса на условия Боз-Суйской ГЭС. Ниже приводим значения к. п. д., полученные из пересчитанной универсальной характеристики, а также для сравнения приводим и к. п. д., данные Ленинградским заводом для 4-й турбины, ввиду того, что 4-я турбина изготавливается для тех же условий, что и первые.

Мощность N л. с.	$H_{\text{нетто}}$ метров	Q м ³ /сек	К. п. д. по унив. хар.	К. п. д. для 4-й турбины	Число об/мин
1 560	13,5	10,6	82	820	375
-1 360	13,5	9,1	73	835	375
1 170	13,5	8,2	68	790	375
975	13,5	7,3	63	740	375
780	13,5	6,4	—	680	375

¹⁾ См. Шапов Н. М. — Испытание Боровенской гидростанции.

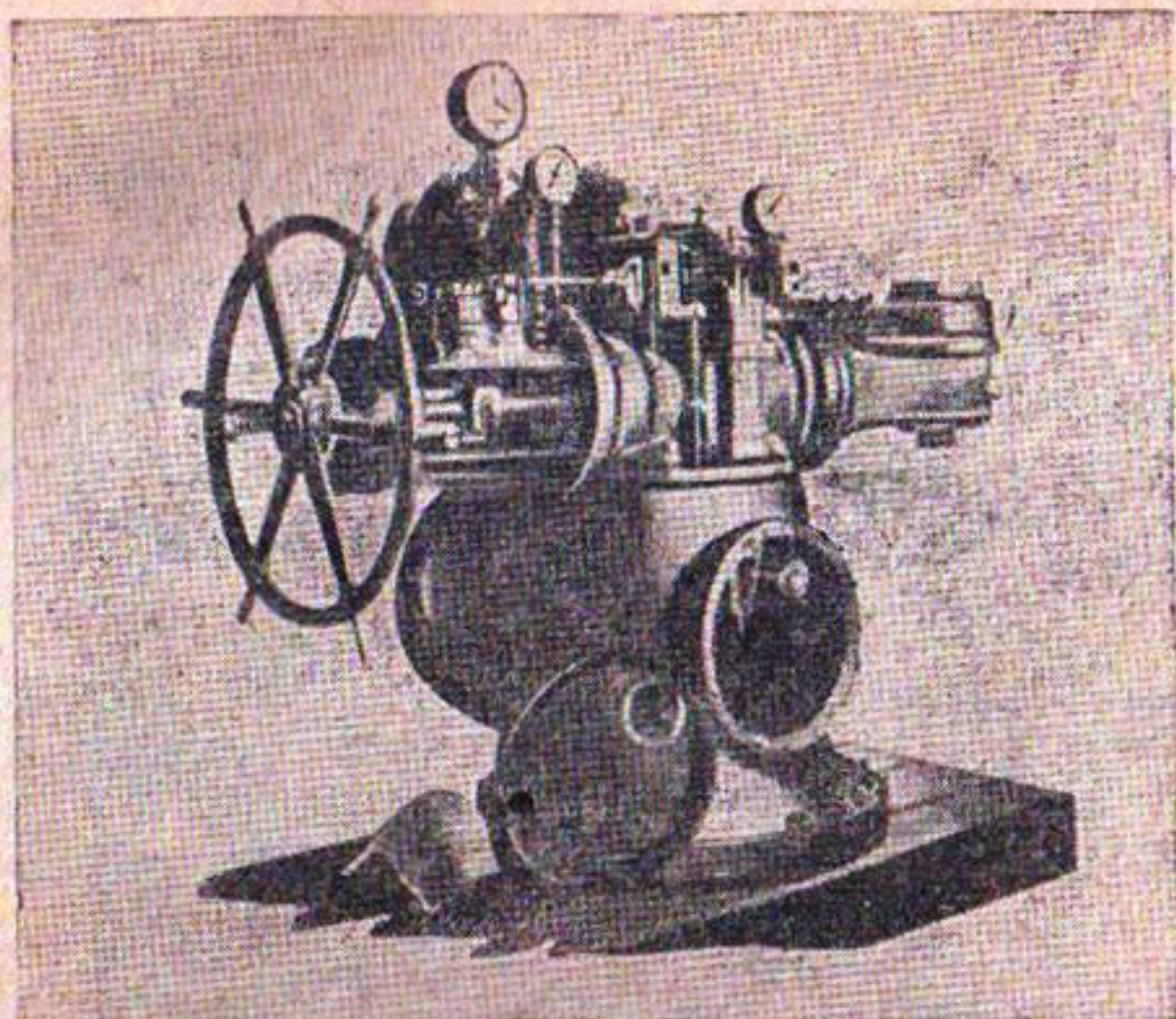


Рис. 22. Регулятор.

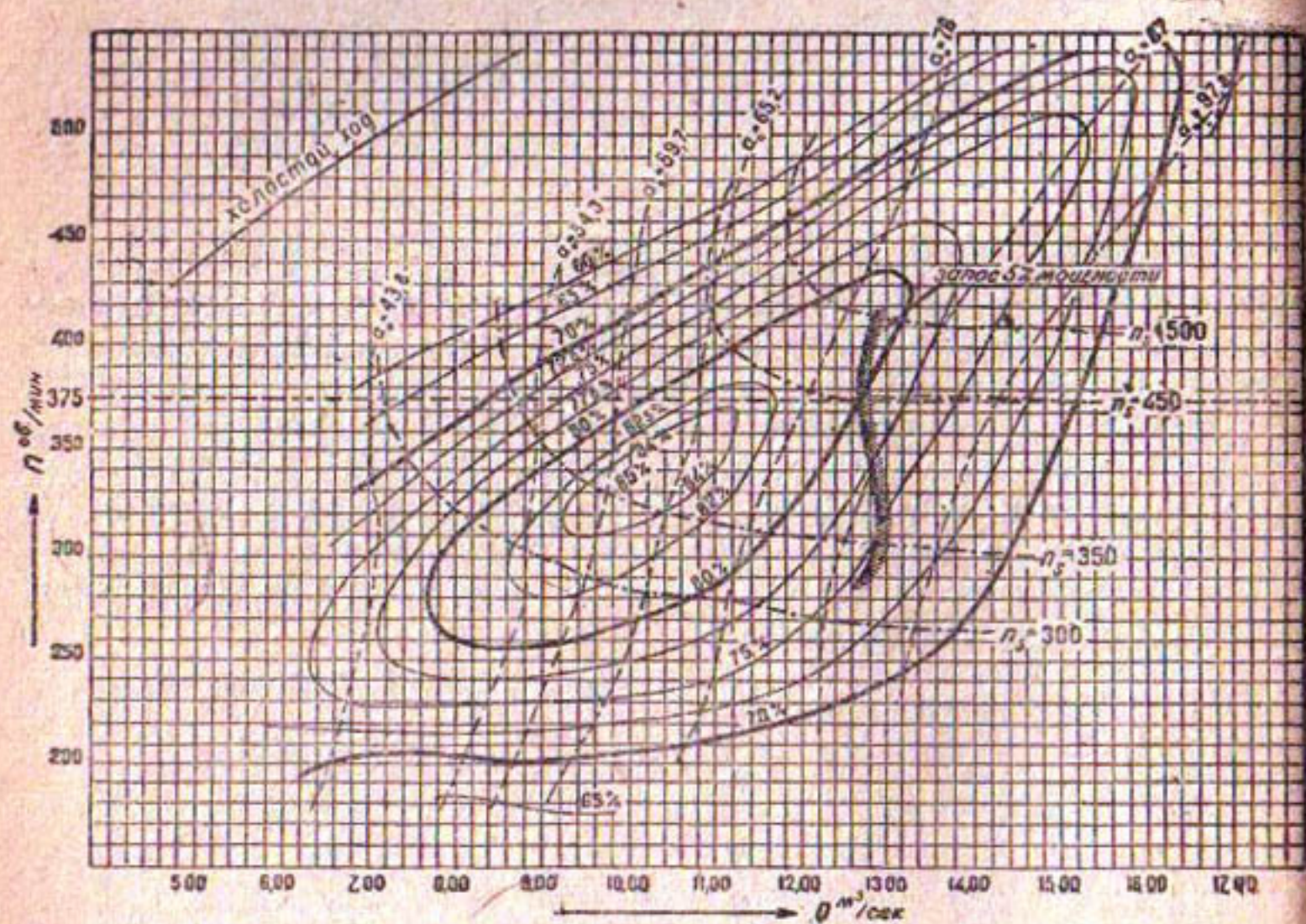


Рис. 23. Универсальная характеристика турбинной модели, пересчитанная на условия турбины Боз-Суйской гидростанции.

Гарантийные значения изменения числа оборотов от нормального (при наличии изготовленного регулятора и маховика) заводом были даны следующие: при внезапной разгрузке турбины на 100, 50 и 25% соответствующее изменение числа оборотов не превышает 12; 5; 2, 5% при условии, что маховой момент генератора будет не менее $17\,500\text{ кг/м}^2$, а произведение из длины трубопровода на скорость воды в нем не более 4,6. Разгонное число оборотов турбин 735 об/мин.

Вал турбины при помощи эластичной муфты соединен с валом генератора (рис. 24). Все три генератора трехфазного тока совершенно идентичны между собой, изготовлены Харьковским электромеханическим заводом, $N=1250\text{ kW}$, $n=375\text{ об/мин.}$, $E=6600\text{ V}$, $I=109,5\text{ A}$, типа ESD 83908, 83909, 104540.

По специальному запросу завода были получены протоколы заводских испытаний указанных генераторов, где были приведены их к. п. д.

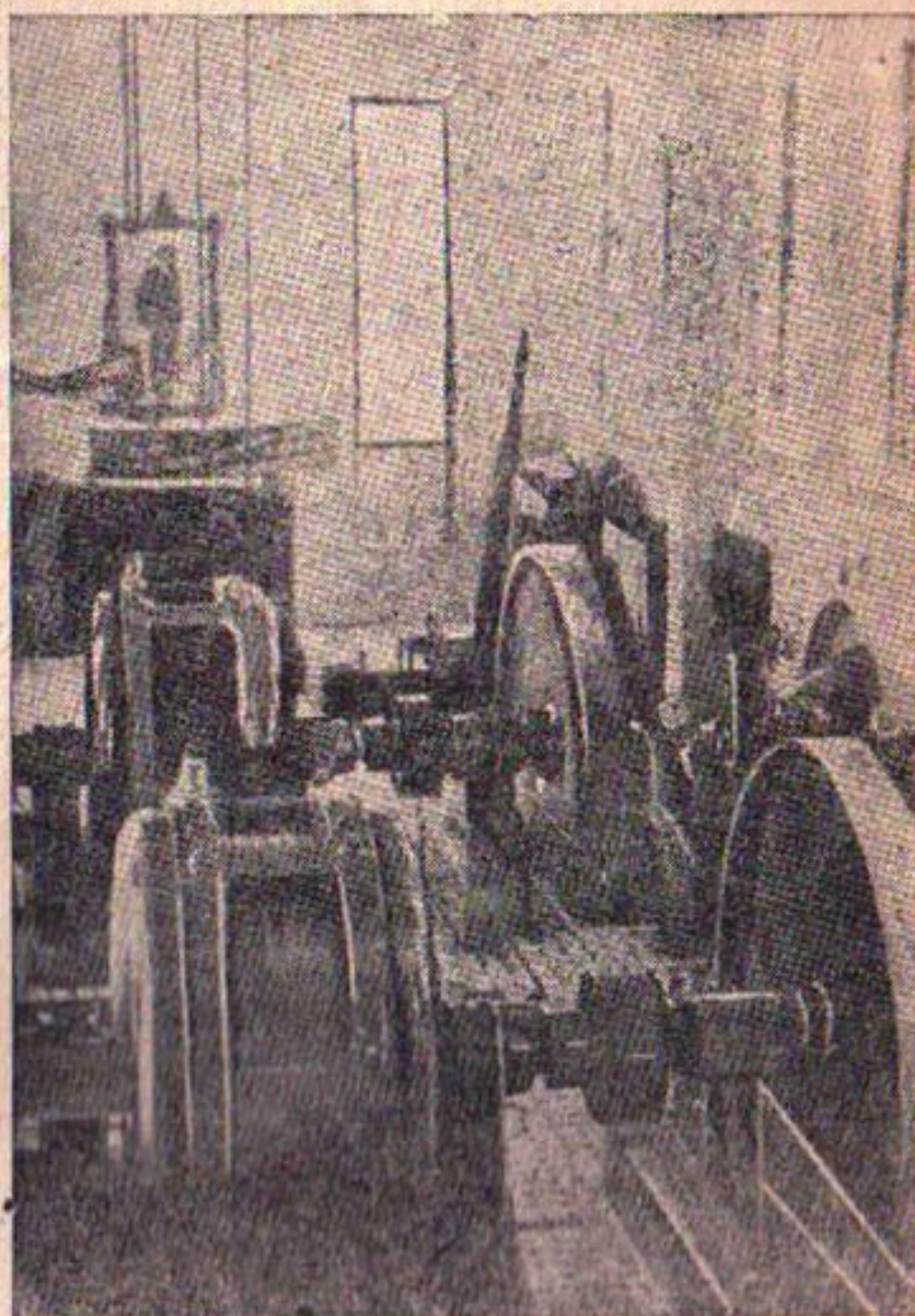


Рис. 24. Машинный зал.

Таблица к. п. д. при $n=375\text{ об/мин}$

Нагрузка	100%	75%	50%	25%
При $\cos f=1,0$	93,3	91,7	90,6	84,8
„ $\cos f=0,8$	92,8	90,7	89,2	—

Потери холостого хода составляют около 39 kW (см. табл. на стр. 132). Потери холостого хода равны $40,5\text{ kW}$.

В машинном зале на площадке расположен распределительный щит со всеми необходимыми приборами.

Таблица к. п. д. при $n = 360$ об/мин.

Нагрузка	100%	75%	50%	25%
При $\cos f = 1,0$	93,0	91,4	90,2	84%

Здание распределительного устройства размерами в плане 7×18 м расположено рядом с зданием станции, откуда ток напряжением 6600 V передается на городские понизительные подстанции, а затем распределяется по потребителям.

Стоимость всей станции с сетью высокого напряжения и понизительными подстанциями выразилась примерно в 4 500 000 руб. При трех тур-

бинах стоимость установленной лошадиной силы около 1000 руб.

Тариф на электроэнергию для промышленных целей установлен 4—7 коп.

На рис. 25 мы видим общий вид Боз-Суйской гидростанции с нижнего бьефа.

Главные потребители энергии в Ташкенте: трамвай, госмельница, механические мастерские Главхлопкома, кожзавод, лесопильный завод, механический завод „Ильича“ и прочая мелкая

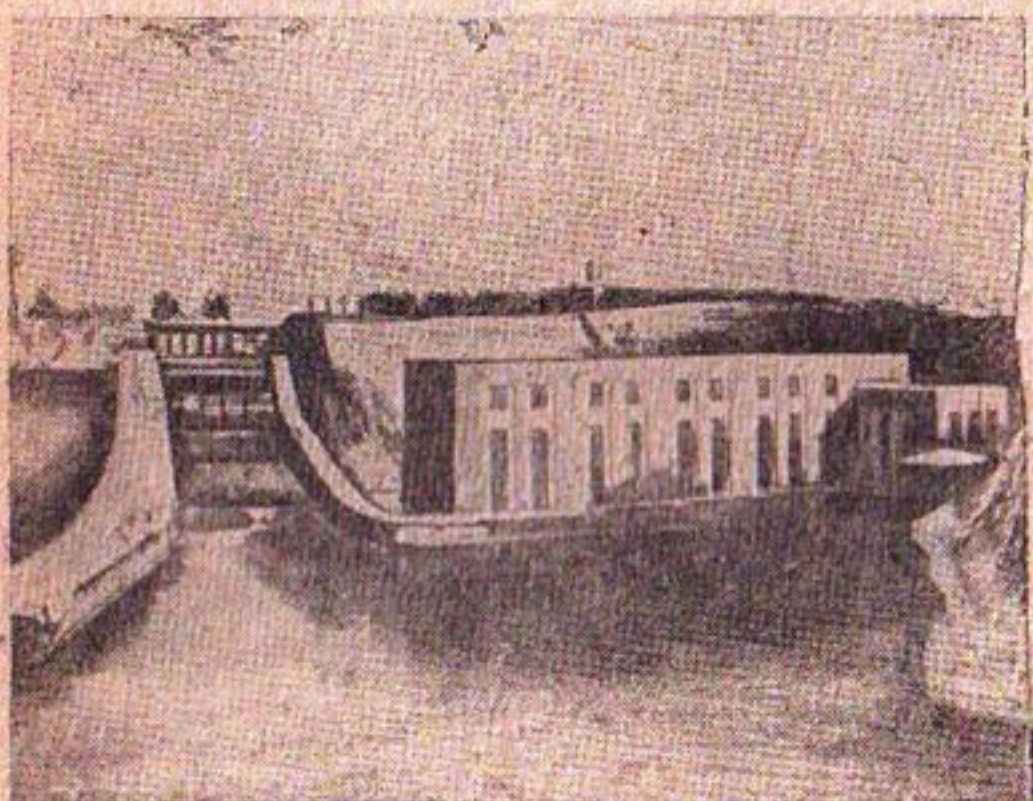


Рис. 25. Общий вид станции.

промышленная и осветительная нагрузка Ташкента. Кроме Боз-Суйской гидростанции в Ташкенте имеется также дизельная станция с шестью двигателями общей мощностью 1600 kW.

На рис. 26 виден род нагрузки гидростанции с 1926 по 1932 г.

В настоящее время в вечерний максимум как гидростанция, так и дизельная станция полностью загружены: ощущается нехватка энергии. В связи с этим в 1930 г. и начата была постройка Кадырьинской ГЭС (пускаемая в текущем году в эксплуатацию), а также заказана 4-я турбина для Боз-Суйской станции. В связи с установкой 4-й турбины, а также в связи с ненормальной работой станции (которая побудила выполнить описываемую здесь работу) перед Ташгэстромом (владельцем станции) встает вопрос об отводе воды от гидростанции по нижерасположенной системе арыков.

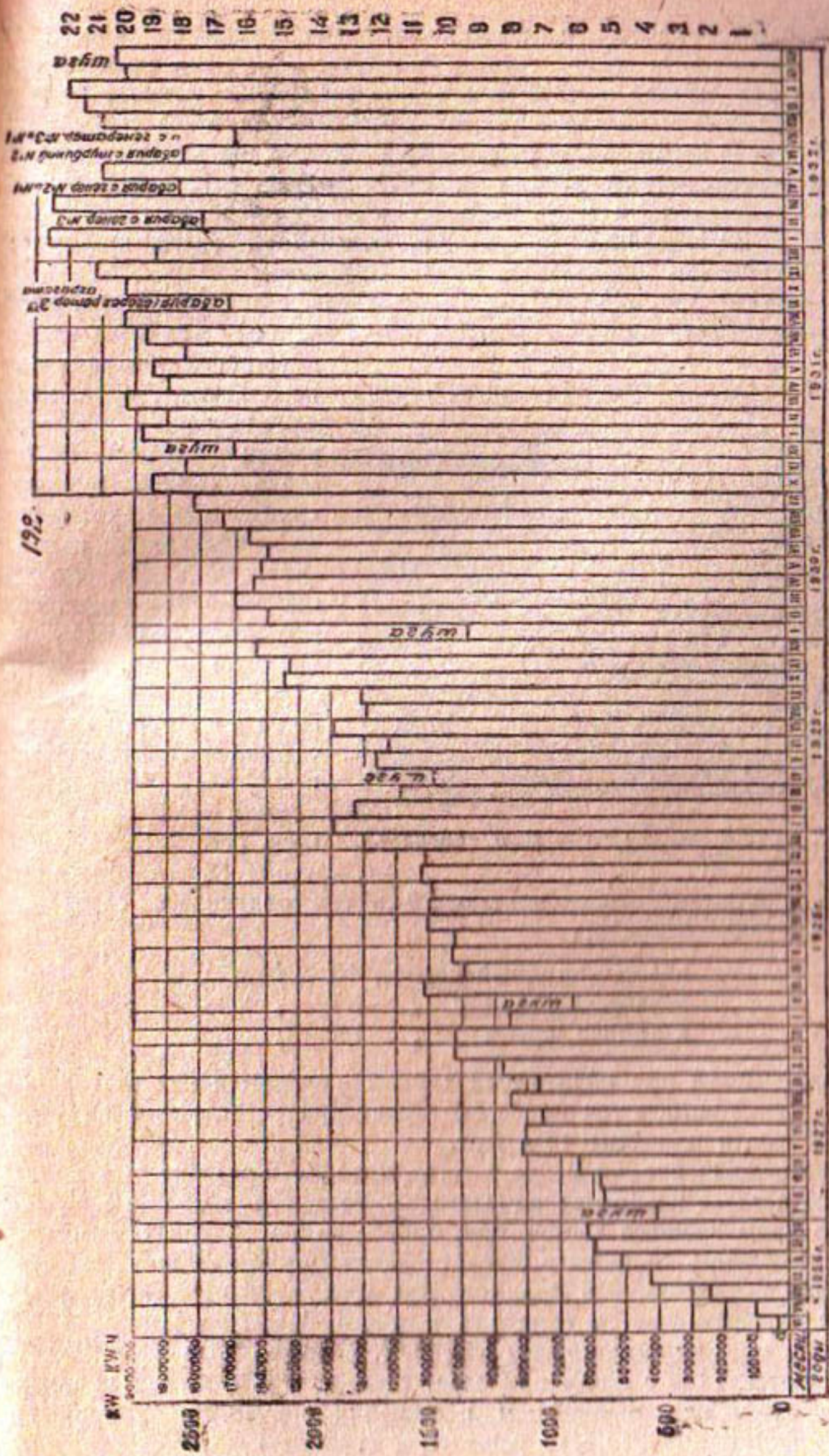


Рис. 26. График месячных нагрузок с 1925 по 1932 г.

Как уже упоминалось, на 4 км ниже гидростанции ар. Боз-Су делится на два крупных арыка Анхор и Калькауз, которые в свою очередь делятся на ряд мелких и мельчайших ирригационных арыков, вода из которых собираясь и образует нижний Боз-Су. Пропускная способность арыков Анхор и Калькауз — точнее мелких арыков, на которые они делятся, — в вегетационный период равна $30 \text{ м}^3/\text{сек}$, в невегетационный но неморозный период система пропускает расход, равный $15 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Зимой с наступлением морозов и выпадением снега пропускная способность системы уменьшается до $7-8 \text{ м}^3/\text{сек}$.

С установкой 3-го агрегата на Боз-Суйской станции явилась необходимость увеличить пропускную способность системы. Это было достигнуто использованием нижнего Салара, куда может дополнительно сбрасываться $20 \text{ м}^3/\text{сек}$. Голова этого сброса Бурджарский многоступенчатый железобетонный перепад (рис. 27 и 28), находящийся на 8 км ниже гидростанции, позволяет направлять в ар. Салар и данный момент расход воды до $20 \text{ м}^3/\text{сек}$ и тем самым дает возможность пропускать большие расходы и через существующую ГЭС. После сооружения Бурджарского перепада с пропускной способностью $20 \text{ м}^3/\text{сек}$ получилась следующая картина: система пропускает

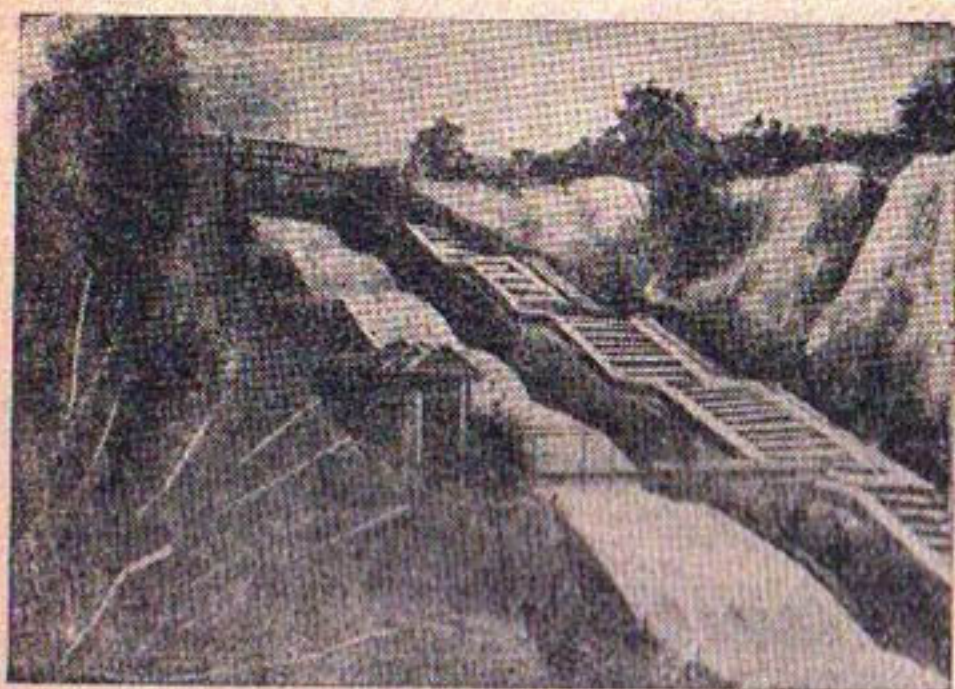


Рис. 27. Общий вид Бурджарского перепада.

в вегетационный период $45 \text{ м}^3/\text{сек}$
в невегетационный " 35 "
в зимнее время " 28 "

В зимнее время при работе трех турбин ощущается недостаток пропускной способности, а тем более это будет при установке 4-й турбины и необходимости пропуска $45 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Другое осложнение, не менее важное, которое может не дать использовать 4-й агрегат в качестве рабочего агрегата, это вопрос о состоянии горизонта воды нижнего бьефа при определенных расходах выше, чем это предполагалось по проекту. Вследствие этого уже при пропуске через гидростанцию расхода, необходимого для трех турбин, т. е. в среднем $30 \text{ м}^3/\text{сек}$, устанавливается горизонт нижнего бьефа на отметке 465,30 при отметке пола машинного зала 465,35, т. е. при расходе $32-33 \text{ м}^3/\text{сек}$ уже появляется вода в машинном зале, сначала в углублении под маховиком, а затем при дальнейшем повышении горизонта просачивается сквозь бетонный пол (в части ближней к перепаду).

Схема Бурджарского перепада

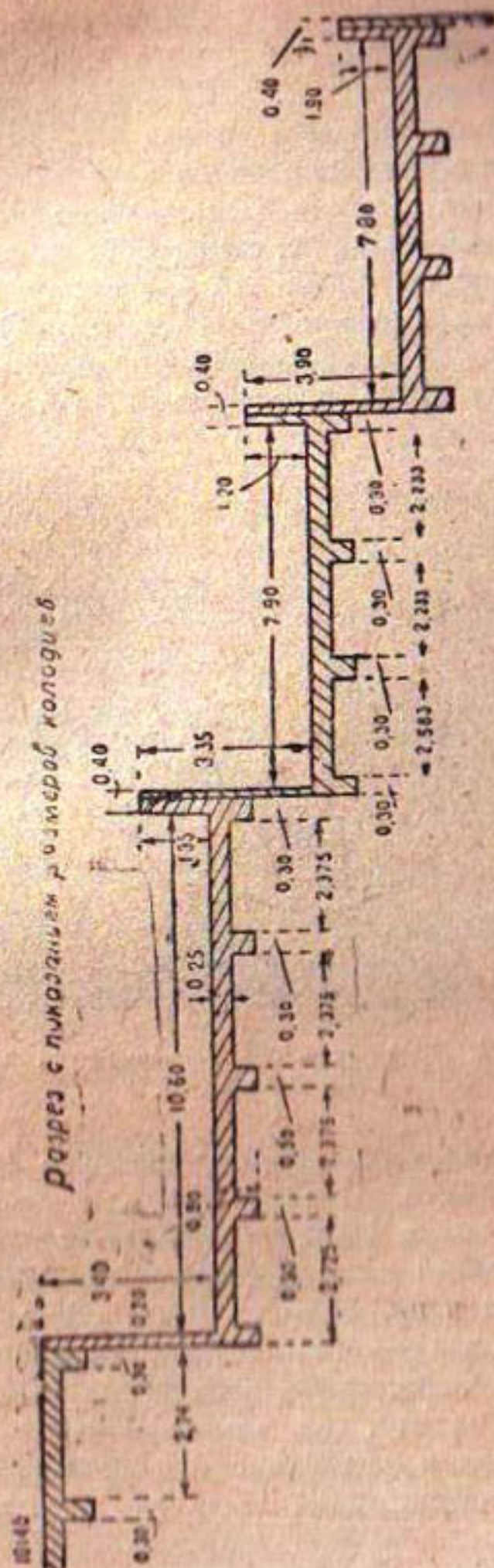


Рис. 28. Бурджарский перепад.

При постройке же предполагалось, что отметка горизонта воды при $Q = 30 \text{ м}^3/\text{сек}$ будет 464,415, т. е. ошибка произошла примерно на 0,90 м. Следовательно, при $Q = 45 \text{ м}^3/\text{сек}$ вместо предполагаемой отметки горизонта воды нижнего бьефа 465,055 в действительности она будет 465,95, т. е. пол машинного зала будет покрыт более чем полуметровым слоем воды. Наряду с этим уменьшился предполагаемый напор $H_{\text{нетто}}$ и стал неясен вопрос, с каким к. п. д. работают турбины. Отсюда возник вопрос не только об увеличении пропускной способности нижней системы, но также и об искусственном понижении горизонта воды нижнего бьефа. Это предположено достигнуть путем спрямления и расчистки ар. Боз-Су ниже гидростанции, а также постройки Бурджарской ГЭС, что по примерным подсчетам

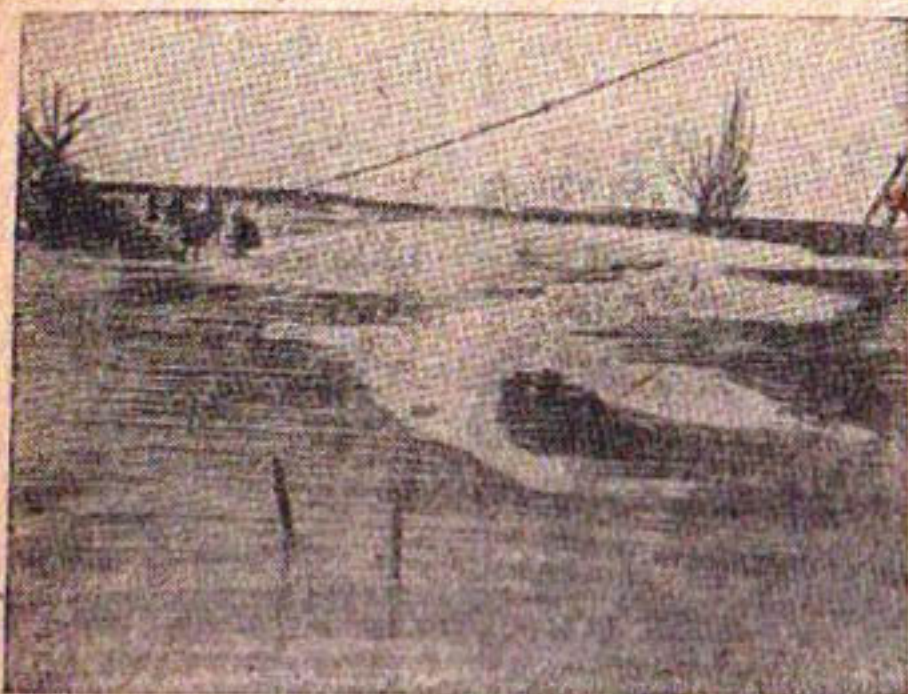


Рис. 29. Пропуск шуги у регулятора Юмалак-Тепе.

может дать понижение нижнего бьефа на 0,7 м.

Для того же чтобы произвести некоторые экономические подсчеты о рентабельности затрат довольно больших сумм на проведение указанных работ, а также определить и размер этих сумм, Ташгэстромом и было предложено Институту провести работу по испытанию турбин с целью освещения вопроса о влиянии пониженного напора на к. п. д. турбины.

Заканчивая краткое описание Боз-Суйской ГЭС, ос-

ветим кратко один вопрос, довольно сильно влияющий на нормальную работу станций. Это вопрос о борьбе с шугой. Наличие довольно холодных зим с 1926 по 1933 гг. с морозами, достигающими до $20-25^\circ$, способствовало интенсивному образованию шуги как в русле р. Чирчик, так и в ар. Боз-Су. Шуга, образовавшаяся в р. Чирчик, задерживалась по возможности у регулятора Юмалак-Тепе (рис. 29) при помощи установки специальных запаней и сбрасывалась обратно в р. Чирчик. Несмотря на это, на протяжении 3—4 км от головного сооружения Юмалак-Тепе в русле ар. Боз-Су в виду больших скоростей и невозможности образования ледяного покрова опять появилась значительная масса шуги.

Главное сооружение ар. Салар, где можно было бы сбрасывать образующуюся выше шугу и не допускать прохода шуги к гидростанции, обладало следующими недостатками: во-первых, оно далеко отстояло от главного фарватера ар. Боз-Су и, во-вторых, имело такие водовыпускные отверстия, что выпуск через них воды возможен был только из-под щита.

На самой станции никаких специальных сооружений для пропуска и защиты от шуги предусмотрено не было.

При таком положении в 1926/27 и 1928/29 гг. вся масса шуги, скользя до верхней части подпертого бьефа гидростанции, забивала его, создавала дополнительный подпор в верхней части подпертого бьефа и создавала опасность перелива воды через стенки сооружений и ограждающие дамбы. Для предотвращения этой опасности гидростанция на некоторое время принуждена была останавливаться.

В 1928 г. у головного сооружения ар. Салар был выстроен специальный шугосброс — деревянный лоток шириной 7 м со спецевыми заторами во входной своей части (рис. 6). За головным сооружением русло ар. Боз-Су во время хода шуги перегораживалось запанью козырьком в 1 м (рис. 30), при помощи которой вся шуга направлялась к этому шугосбросу. Зимой 1926/30 г., когда установились

очень продолжительные морозы, сопровождающиеся появлением шуги, вначале все сооружения работали вполне хорошо, но стоило только на некоторое время образоваться перед шугосбросом затору, как вся шуга, сорвав запань, устремлялась к гидростанции, забивая русло реки и в водохранилище под ледяным покровом образовывался слой шуги, достигающий до 2 м толщины. Для того чтобы шуга окончательно не забила русло реки, необходимо было все время

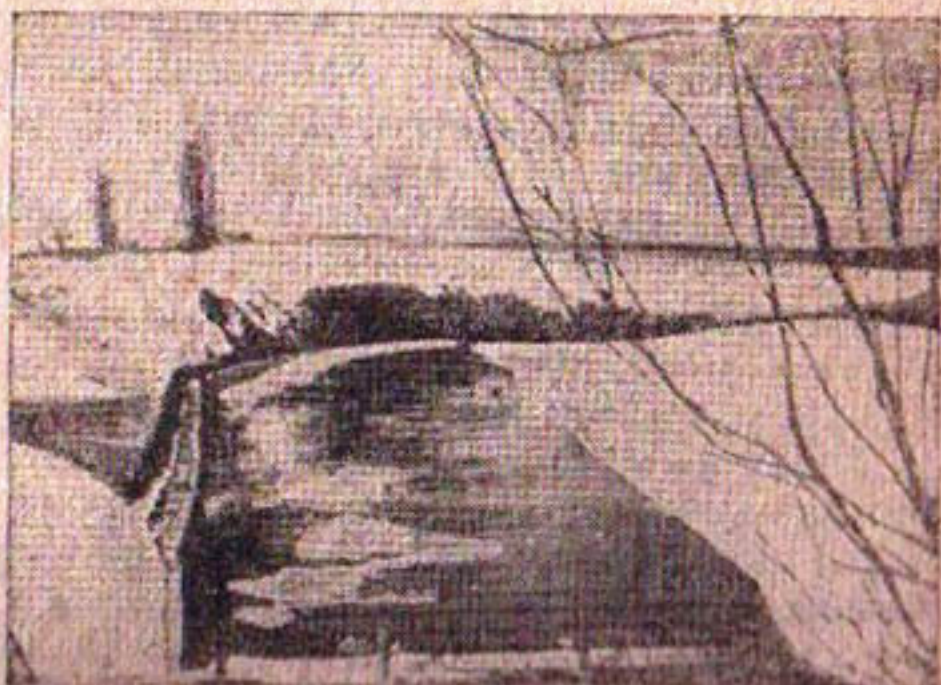


Рис. 30. Сброс шуги в ар. Салар.

очищать подход к шугосбросу, для чего обычно вызывалась команда подрывников. Но взрывание работ не достигало цели в борьбе с шуговыми заторами, приходилось вручную баграми очищать подход к шугосбросу. В результате всего уровень в водохранилище значительно понижался, и на некоторое время нормальная работа станции нарушалась.

Зима 1932/33 г. была особенно холодная, с сильными морозами, при отсутствии поверхностного льда. В ноябре месяце 1932 г. при температуре воздуха — 17°C и воды — $0,1^{\circ}\text{C}$ наблюдалось особенно интенсивное образование шуги; чтобы предотвратить забивку шугой решеток последние были на 25% сняты. Регулирование было переведено на ручное. Тем не менее станцию все-таки пришлось остановить, 3 декабря этого же года станция была также остановлена, так как шуга, при снятых решетках, забила трубопровод, который был очищен через люк вручную.

В остальные дни в течение этой зимы, хотя станция и не останавливалась совсем, но часто работала с неполной нагрузкой и многие абоненты оставались без электроэнергии. Кроме описанных выше мероприятий по борьбе с шугой, по предложению отдельных лиц применялись самые разнообразные мероприятия; так например: кроме запани у Салар-

ского шугосброса была установлена запань перед входом в напорный бассейн для сброса шуги через перепад, где одно из отверстий было перекрыто шандорами и осуществлялся перелив воды сверху шандор. Кроме этого несколько раз пробовали снимать решетки и пропускать шугу в турбины (результаты описаны выше), менять отверстия решеток с 30 мм до 100 мм, особенно усиленно очищать решетки специальными граблями, сбивать с решеток лед тяжелыми молотками и пр.; и все же следует считать, что все эти мероприятия не смогли и не смогут в дальнейшем обеспечить нормальную работу станции в зимний период. Для этого необходимо вопрос ставить более широко, начав планомерное изучение зимнего режима арыка Боз-Су и всех явлений, связанных с образованием шуги в районе гидростанции. Тапгэстромом в последнее время такие наблюдения с выработкой мер борьбы поручены Средне-Азиатскому научно-исследовательскому институту при консультации Ленинградского института гидротехники.

На рис. 26 видны периодические зимние провалы в выработке электроэнергии, что явилось результатом вышеописанного. С 1926 г. по 1932 г. общая недовыработка электроэнергии составляет примерно 2 000 000 kWh или, считая стоимость одного киловатт-часа равной 5 коп., получим убыток в 100 000 руб., не считая сумм, затраченных на борьбу с шугой и на убытки, понесенные абонентами из-за нарушения их нормальной работы вследствие нехватки электроэнергии.

Вывод из всего вышесказанного таков: во-первых, необходимо при проектировке гидротехнических сооружений на реках, на которых возможно образование шуги, заранее предусматривать сооружения, при помощи которых можно было бы бороться с этим явлением, а во-вторых, необходимо в научно-исследовательских институтах Союза поставить систематическое изучение как причин образования шуги, так и мер борьбы с ней, так как, известно, на ряде станций северных (Волхов), туркестанских (Боз-Су), кавказских (Ленинакан, Эривань) имеет место образование шуги, влияющей на нормальную эксплуатацию станций, а борьба с ней ведется самым кустарным способом.

Из более мелких дефектов в работе станции можно указать на следующие.

В сильные морозы открытые металлические трубопроводы как снаружи, так и внутри покрываются ледяной коркой. Последняя, кроме стеснения сечения и увеличения потерь, при оттепели попадает в турбины и нарушает нормальную их работу.

Сильные холода влияют также и непосредственно на турбины, расположенные, как указывалось, вне здания, так как при этом наблюдается обмерзание отдельных частей турбины и направляющего аппарата. Для улучшения работы станции решено утеплить трубопровод камышитом со штукатуркой, а над турбинными кожухами сделать легкое каркасное здание с отоплением его теплым воздухом из генераторного здания. На графике (рис. 26), кроме провалов вследствие шуги, можно видеть также провалы от различных аварий; особенно многочисленны они были в 1932 г. Отметим из них следующие: 27 июля 1922 г. произошла авария с турбиной № 2 из-за среза 2 болтов привертных лопаток рабочего ко-

а. Одна лопатка упала в нижний бьеф, а другая повисла на болту и вращении повредила лопатки направляющего аппарата, которые пришлось сменить. 25 ноября 1932 г. из направляющего аппарата извлекли щетки для очистки решетки, сделанные из обрезка уголка $50 \times 50 \times 250$ мм с 5 зубьями из круглого железа 25×200 мм. При осмотре щетки на лопатках рабочего колеса были обнаружены зазубрины щеткой до 50 мм, а на лопатках направляющего колеса до 15 мм. Указав на основные причины, нарушающие нормальную работу Боз-Су-ской гидростанции, перейдем к описанию работ по испытанию турбин регуляторов указанной станции.

3. ИСПЫТАНИЕ ТУРБИН.

Общие соображения.

Испытание турбин было вызвано желанием Ташгэстрома (владельца станции) знать к. п. д. турбин при настоящих условиях (пониженном напоре) и при условии, что горизонт нижнего бьефа будет понижен и действующий напор будет равен гарантийному ($H = 13,50$ м), чтобы на основе сравнения данных при двух указанных условиях можно было подойти к выяснению рентабельности затрат на работу по понижению нижнего бьефа. В соответствии с этим и было решено провести испытание турбин:

1. При напоре, близком к нетто $= 12,70$ м. Это действительный напор, имеющийся в данное время на гидростанции при отметках горизонта верхнего бьефа, равных 478,179 м и горизонта нижнего бьефа — 465,268 м, при нормальном числе оборотов $n = 375$ об/мин и различных нагрузках.

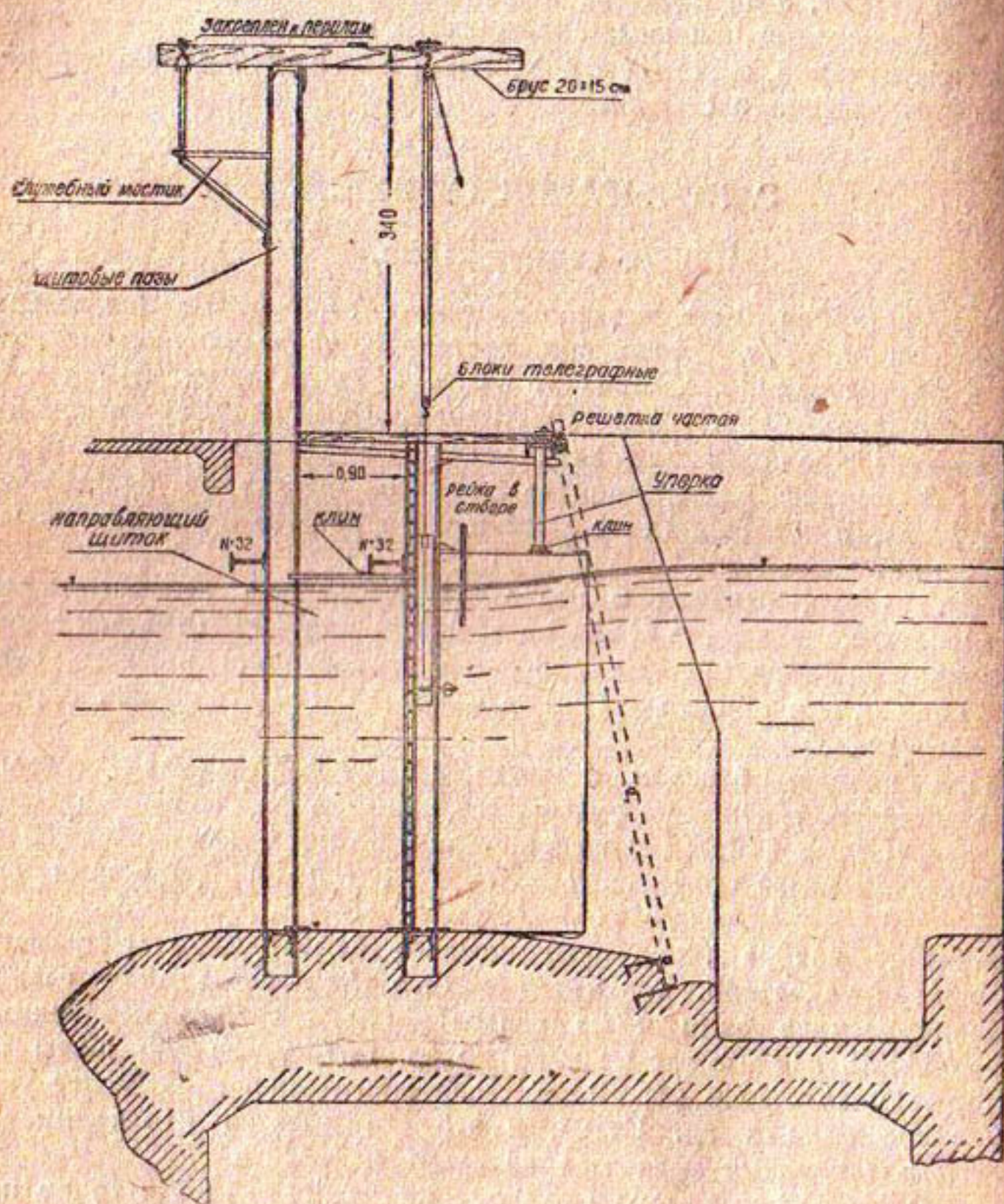
2. При напоре, близком к нетто $= 13,50$ м. Это гарантийный напор для данных турбин, получающийся при отметках горизонта верхнего бьефа, равных 478,179 м и горизонта нижнего бьефа — 464,416 м, при нормальном числе оборотов $n = 375$ об/мин и при различных нагрузках.

Увеличение напора (понижение нижнего бьефа) было сопряжено с большими трудностями, так как для этого требовалось значительное уменьшение расхода воды через гидростанцию, для чего необходимо было уменьшить вообще расход воды по ар. Боз-Су, закрыв щиты на регуляторе Юмалак-Тепе (на 30 км выше гидростанции), а также увеличить сброс воды в ар. Салар, а это все вызвало необходимость выключить ряд крупных абонентов на время испытания.

Отметки 464,416 м, а следовательно, и напора $H = 13,5$ м точно получить не удалось, и переход к этому напору был уже сделан путем пересчета, что, как будет видно ниже, на точности результатов не отразилось.

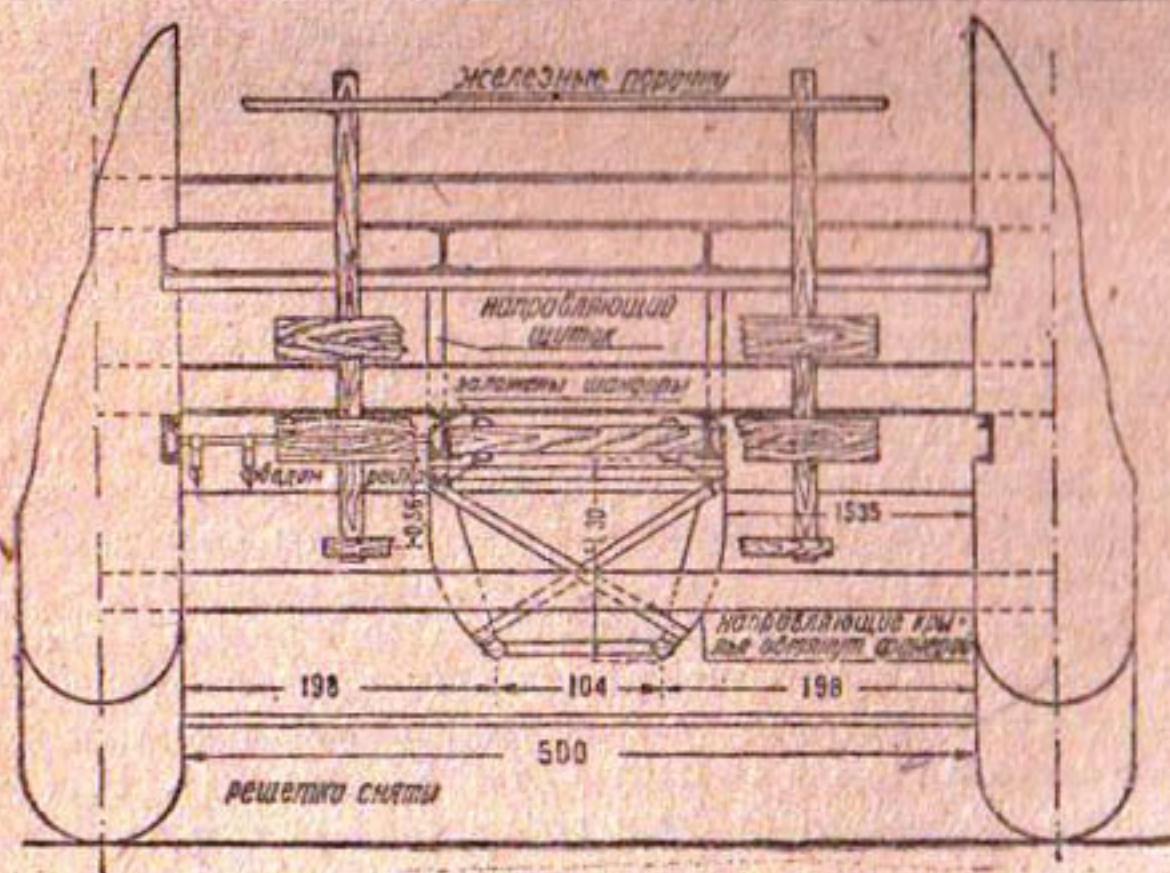
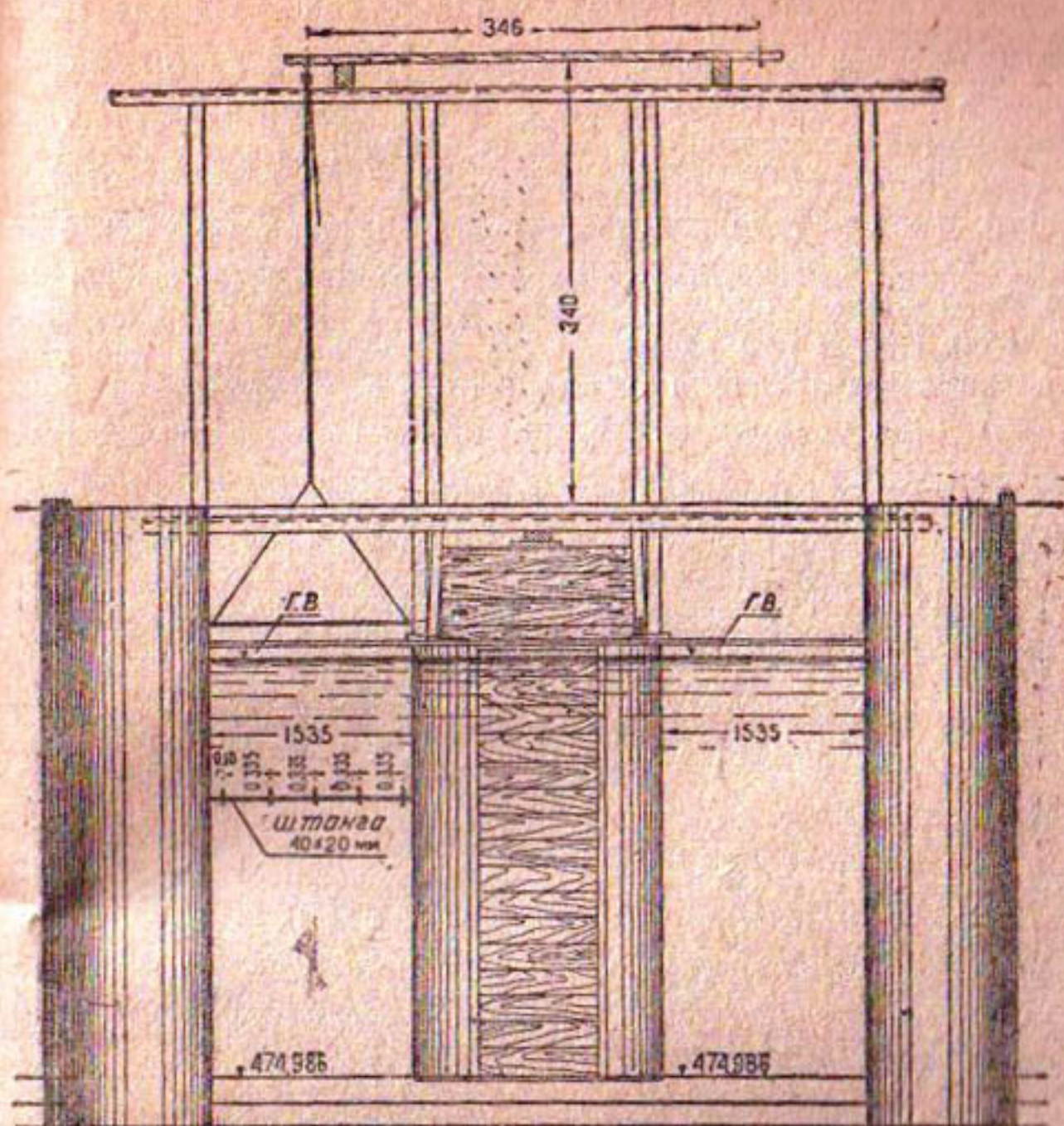
Ввиду полной идентичности всех турбин и генераторов решено было произвести испытание только одного из трех агрегатов.

Для испытания был выбран средний агрегат с турбиной № 5312—13 (завода Neumeier) и генератором № 8309 (завод „Электросила“, Харьков).



Оборудование створа
для измерения расхода воды при
испытании турбин Боз-Суйской ГЭС

Рис. 31. Створ для



измерения расхода.

Измерение расхода воды.

При проведении испытаний, измерение расхода воды было решено производить (за отсутствием другого более удобного места) в сечении перед щитовыми отверстиями напорной камеры, используя три пролета для шандор (рис. 17), сняв мелкие решетки.

Вначале было решено для получения больших скоростей в промерном сечении и для ускорения измерений расхода закрыть два крайних пролета шандорами и пропустить весь расход через один средний пролет шириной 1,53 м при глубине воды 3,0 м; причем, в целях уничтожения сильных завихрений и потерь напора при входе воды, в указанный пролет были поставлены впереди струенаправляющие крылья криво-

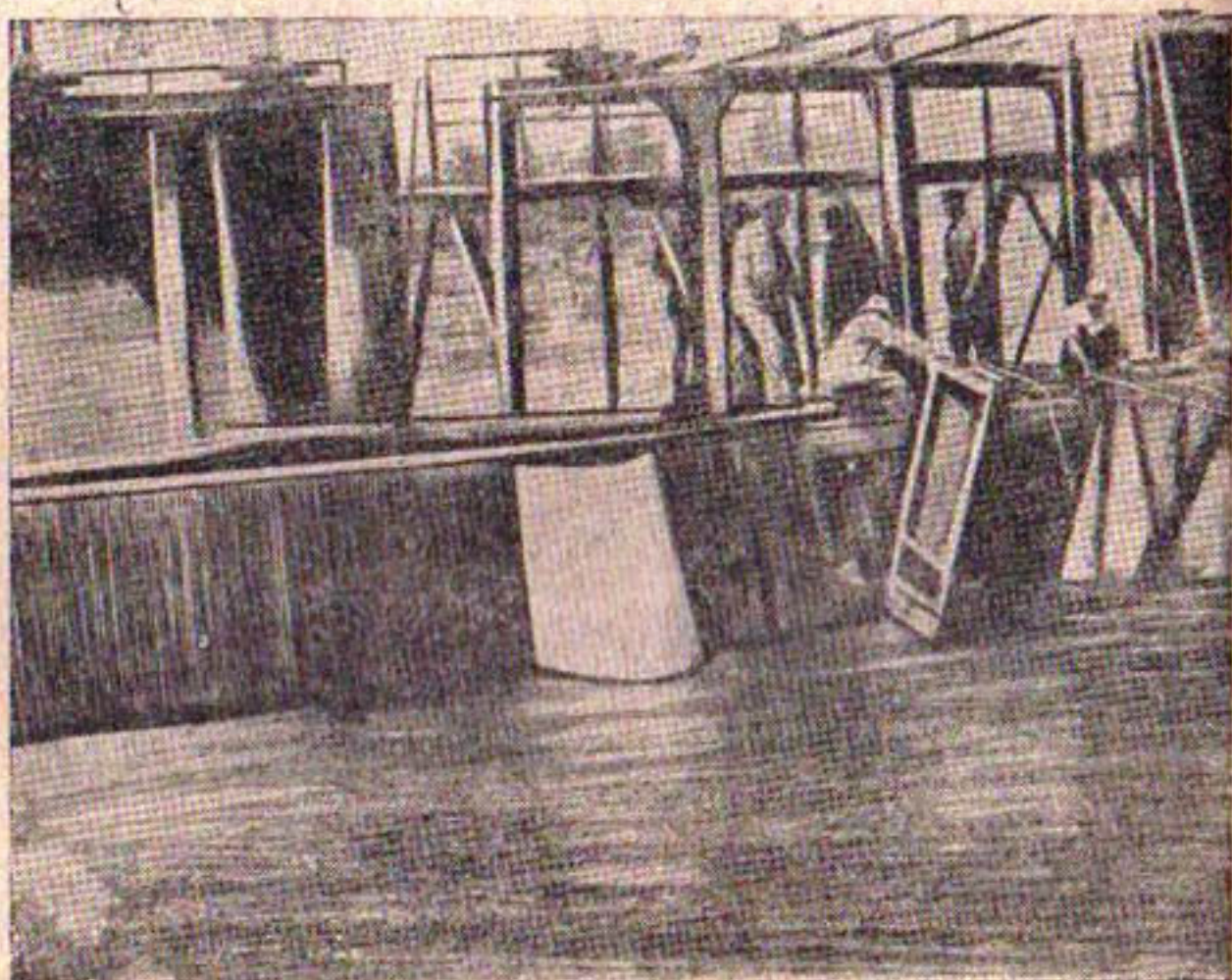


Рис. 32. Установка струенаправляющих щитов.

линейного очертания и за указанным пролетом — прямые крылья между балками, разделяющими пролет в плоскости шандор и в плоскости щитовых затворов (рис. 32). Но благодаря тому, что в самом сжатом сечении при больших нагрузках получились скорости до 2 м/сек, а за ним имело место внезапное расширение, происходило явление удара, которое сопровождалось водоворотами и значительными колебаниями уровня воды в напорной камере, а также происходила значительная потеря напора на суженном участке. Вследствие этого от этой схемы решено было отказаться и пропускать весь расход воды через два крайних пролета, закрыв средний шандорами и оставив прямые крылья на своем месте, а криволинейные развернув в обратную сторону (рис. 31). При этом все вышеуказанные явления удара были совершенно уничтожены.

Струенаправляющие крылья были сделаны из деревянного каркаса, обтянутого фанерой толщиной 5 мм. Каждая пара симметричных крыльев была изготовлена и связана между собой на берегу и уже в готовом виде подводилась к нужному месту.

Таким образом было получено два совершенно одинаковых прямоугольных сечения шириной каждое 1,535 м, при глубине воды 3,00 м.

Для измерения скоростей в этих сечениях была изготовлена железная рама, нижняя сторона которой была сделана из эллиптической штанги размером $2,5 \times 4,0$ см, пролетом 1535 мм; боковые стороны из швеллеров длиной 1,5 м и верхняя из полосового железа. Кроме того рама была растянута по двум диагоналям металлической проволокой.

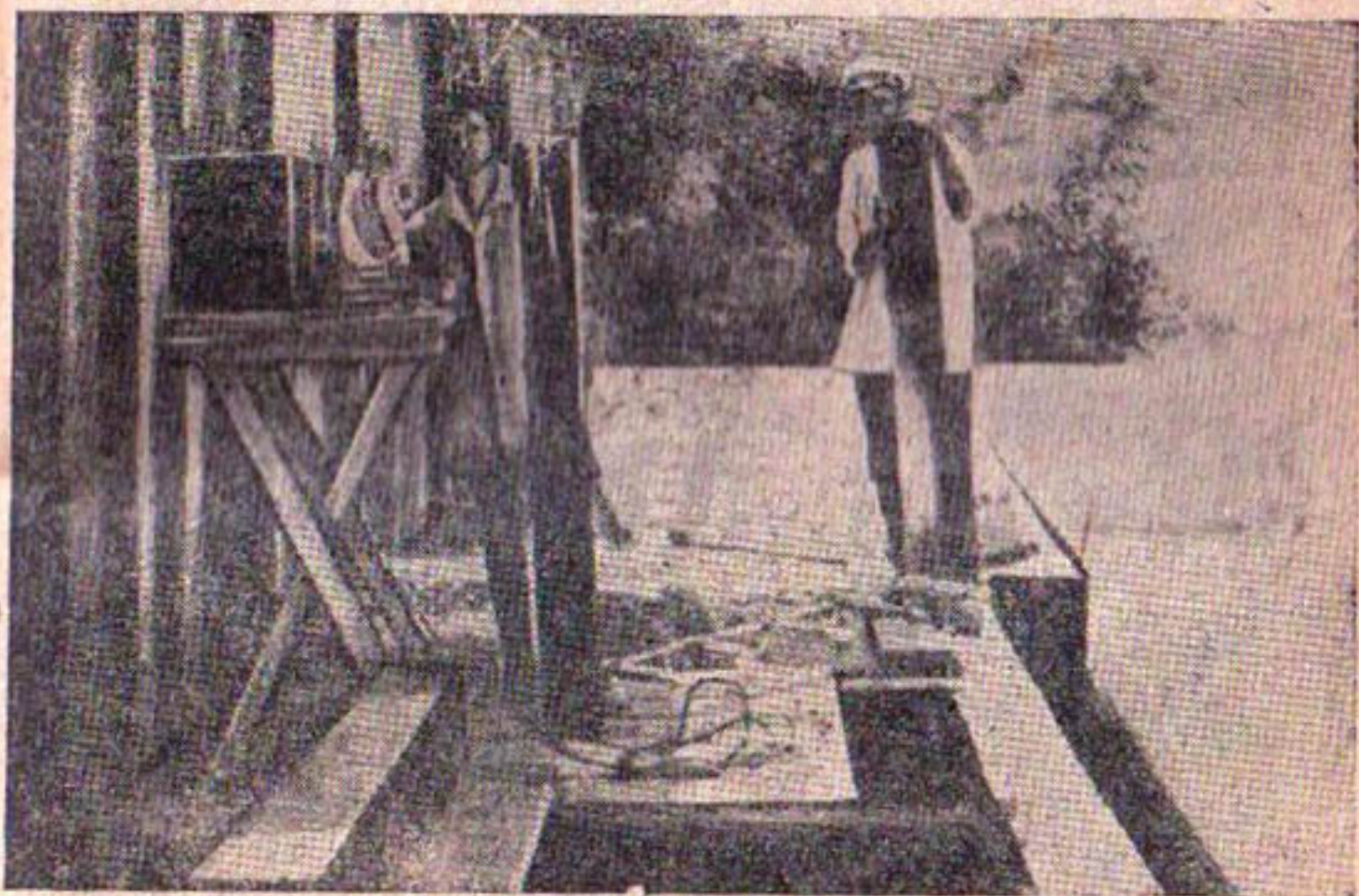


Рис. 33. Рама с вертушками.

Изготовленная рама была подвешена на блоке и ее можно было легко вручную опускать и поднимать в пазах для шандор на нужную высоту в каждом из полученных пролетов. Так как пролетов было два, то раму во время опыта приходилось переносить из одного пролета в другой и подвешивать на заранее укрепленный блок.

На нижней стороне штанги были укреплены при помощи специальных муфт гидрометрические вертушки Отта (масляные — У, типа Texas) (рис. 33). Расстояние крайних вертушек от стенок равно 10 см. Расстояние между вертушками было одинаково и равно 335 мм.

От каждой вертушки был проведен отдельный провод и от штанги — один общий. Все эти провода были пропущены через просверленное в швеллере отверстие и выведены наверх в виде одного кабеля, в пространстве, образованном между длинной полкой швеллера рамы и внут-

ренной стороной двутавровой балки. Регистрация оборотов вертушки и времени между определенным числом оборотов производилась при помощи 8-перого хронографа фирмы Отт (рис. 34). К 5 перьям было

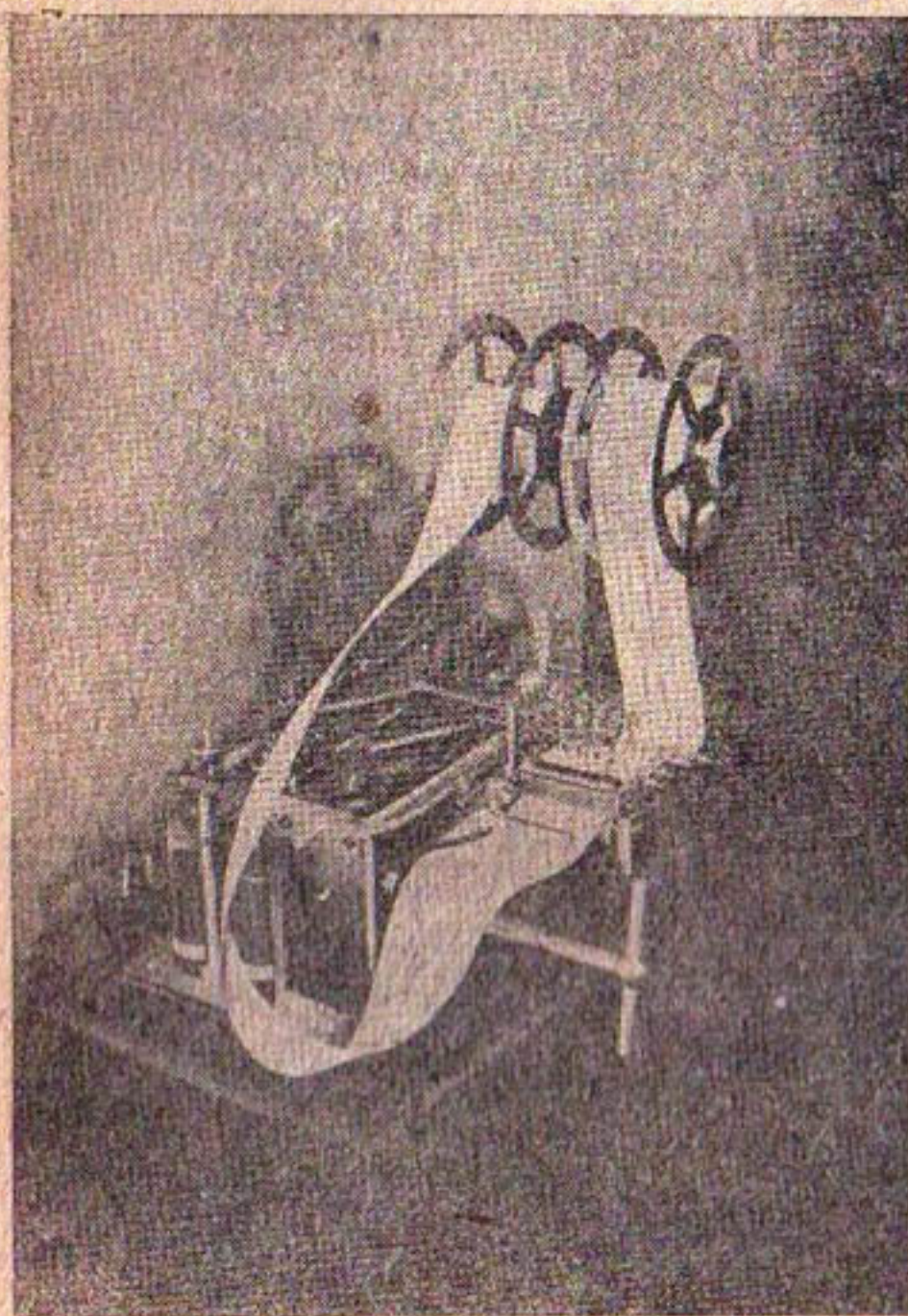


Рис. 34. Хронограф.

присоединено 5 проводов от 5 вертушек, к 6-му перу провод от прерывателя тока (часовой механизм). 2 пера были свободны. Опускание рамы производилось вручную (рис. 35). Установка оси вертушки на определенную горизонталь производилась при помощи размеченного троса, прикрепленного к штанге. Репером служил верх двутавровой балки. Измерения производились в каждом сечении на 7 горизонталях, причем нижняя горизонталь была на 15 см от дна, все последующие через 0,5 м, верхняя на 0,10 м от поверхности. Продолжительность наблюдений на каждой горизонтали была от 1 до 2 мин. Таким образом при одном опыте производились замеры скоростей последовательно в двух сечениях и притом в каждом на 5 вертикалях и 7 горизонталей, т. е. в 70 точках, что

Измерение напора.

Действительный напор, при котором работала турбина в каждом отдельном опыте и который равен $H = h_0 - h_n + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{C_0^2}{2g}$, где h_0 — h_n есть разность отметок оси турбины и нижнего горизонта, $\frac{P_0}{\gamma}$ — манометрическое давление в подводящем трубопроводе у входа в турбину.

привнесенное к оси турбины, и $\frac{C_0^2}{2g}$ — существующий в том же сечении средний скоростной напор, определялся следующим образом¹⁾.

Величина $h_0 - h_n$ определялась как разность отметки оси турбины и отметки нижнего бьефа, последняя определялась во время каждого опыта по водомерной рейке, поставленной в выходном сечении отводящего канала испытываемой турбины.

Величина $\frac{P_{0\gamma}}{\gamma}$ определялась при помощи ртутного манометра (рис. 36), присоединенного к трубке, выведенной из торцевой стенки кожуха

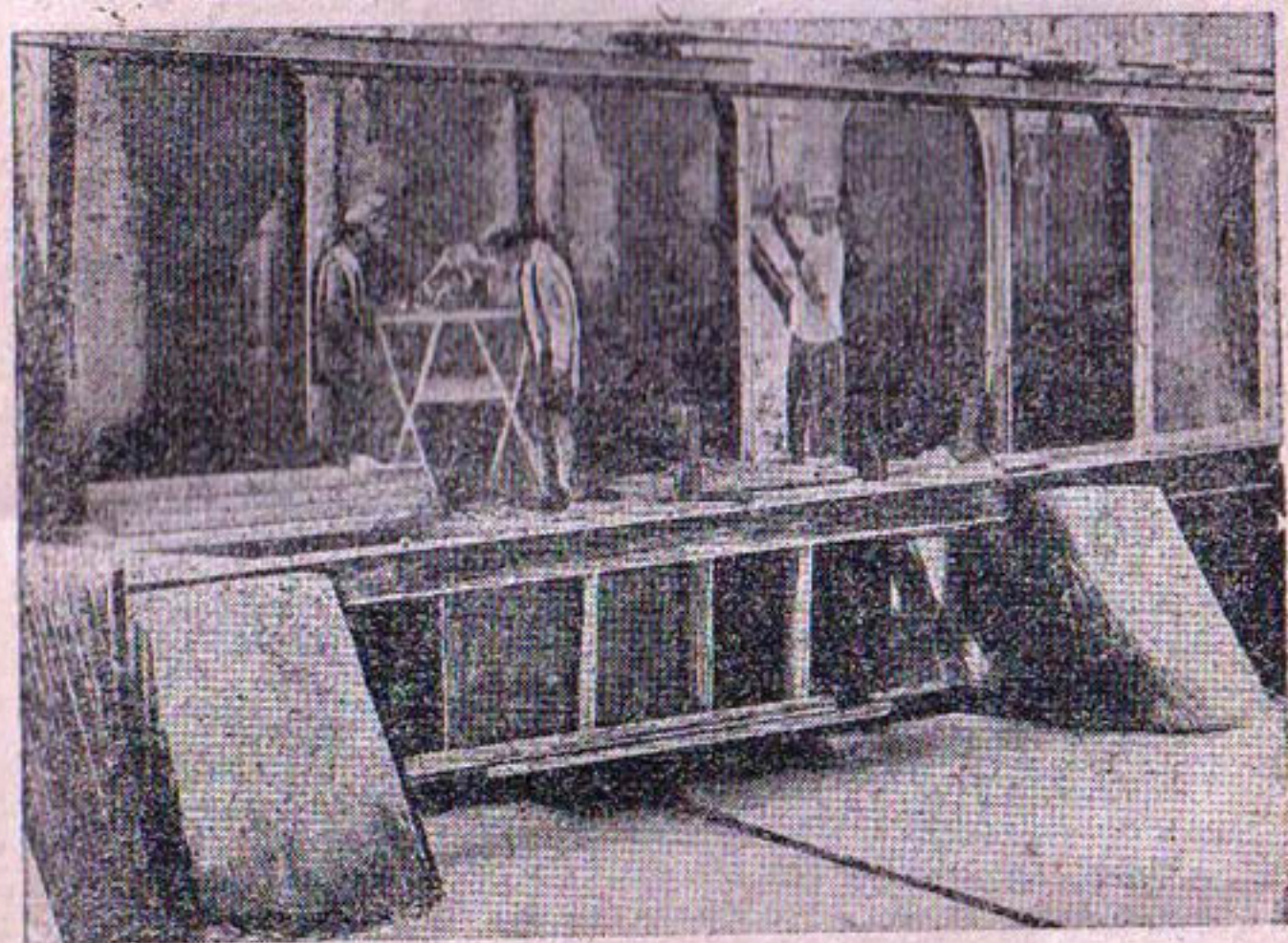


Рис. 35. Производство измерений расхода.

турбины (указанный вывод был сделан при монтаже турбины заводом) (рис. 19). Величина $\frac{C_0^2}{2g}$ определялась по расходу и площади у входа в турбину.

Кроме указанных величин определялись также: 1) полный геометрический напор H_2 при помощи рейки в напорной камере для последующего определения потерь напора в подводящем сооружении при разных расходах, 2) вакуум во всасывающей трубе при помощи ртутного вакуумметра, но при его незначительной величине около 1 м происхо-

1) Величина скоростного напора при выходе воды в нижний бьеф $\frac{C_n^2}{2g}$, где C_n — выходная скорость, ввиду ее малости, была принята равной нулю.

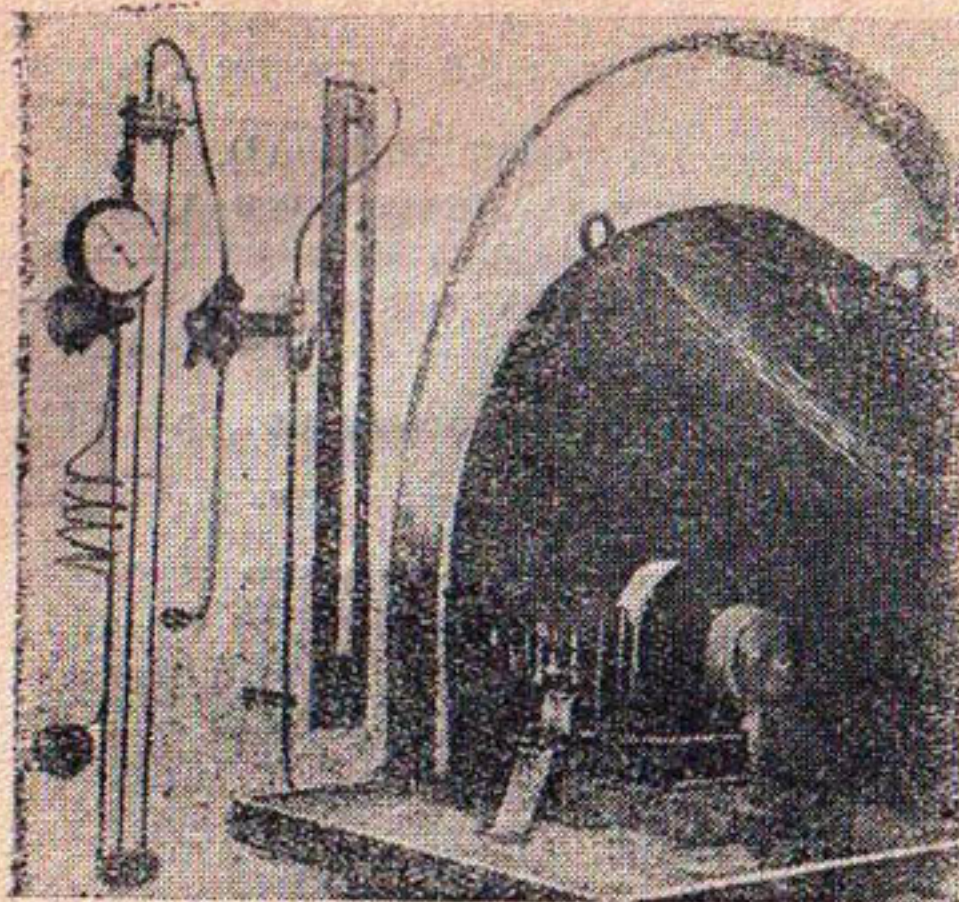


Рис. 36. Манометр и вакуумметр.

больше, так как при постоянном расходе ар. Боз-Су и меняющемся расходе через испытываемую турбину регулировка горизонтов как верхнего, так и нижнего бьефов могла производиться только перепадом и то только при наличии избытка воды. При испытании же турбины на большие нагрузки или при пониженном нижнем бьефе (уменьшенном расходе по ар. Боз-Су) излишка воды для регулировки водосбросом не было, и приходилось поддерживать постоянство отметок бьефов регулировкой сброса воды в ар. Салар, головное сооружение которого расположено на 6 км выше гидростанции.

Несмотря на такую сложную регулировку, все же для каждой серии подобных опытов колебание напора H_2 не превышало 1—2%, колебание же напора H из-за различных величин потерь напора ($H_2 - H$) и скоростных напоров $\left(\frac{C_0^2}{2g}\right)$ достигло величин 3—4%.

Измерение числа оборотов — n .

Число оборотов турбины во время опыта измерялось с очень большой точностью при помощи ручного тахоскопа фирмы Jaquet (рис. 37). Первоначальная установка на нужное число оборотов производилась по ча-

дили такие сильные колебания его, что за точность измерений ручаться совершенно нельзя, действительное его значение для данной работы было и ненужно. Во время каждого опыта брались отсчеты по всем вышеперечисленным приборам через каждые 5 мин. Затем брались средние величины.

Колебания напора H_2 во время производства одного опыта при одной нагрузке были от 1 до 2 см. При производстве же каждой серии подобных опытов (при одном напоре) колебания были

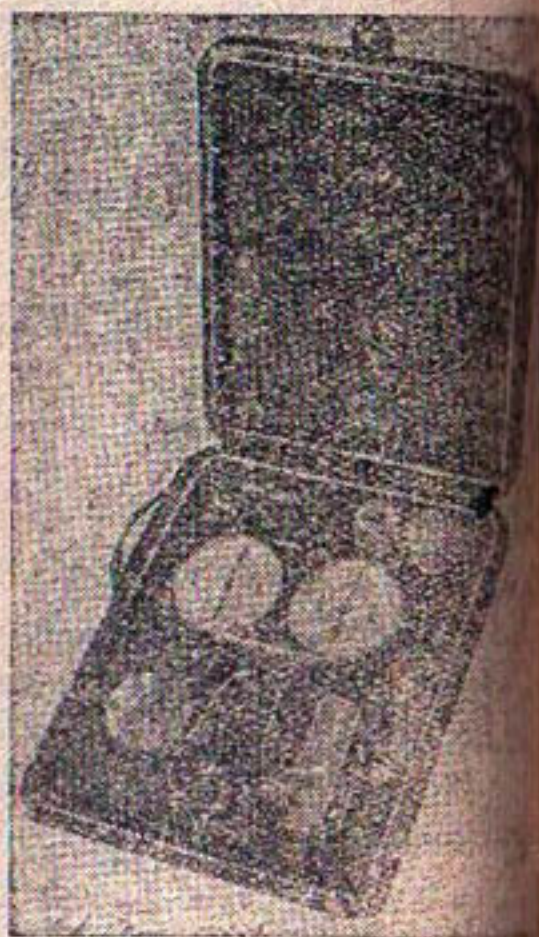


Рис. 37. Счетчик числа оборотов.

стотометру, затем точно выверялось тахоскопом, с последующей проверкой через каждые 5 мин.

Измерение мощности.

Мощность агрегата измерялась при помощи киловаттметра на шито. При одной серии опытов кроме того одновременно производилась проверка процезионными приборами.

Все последующие испытания производились по показаниям щитовых приборов с введением соответствующих поправок. Кроме мощности агрегатов производились также записи вольт, ампер, частоты и $\cos f$ генератора, а также вольт и ампер возбуждателя. Все записи указанных

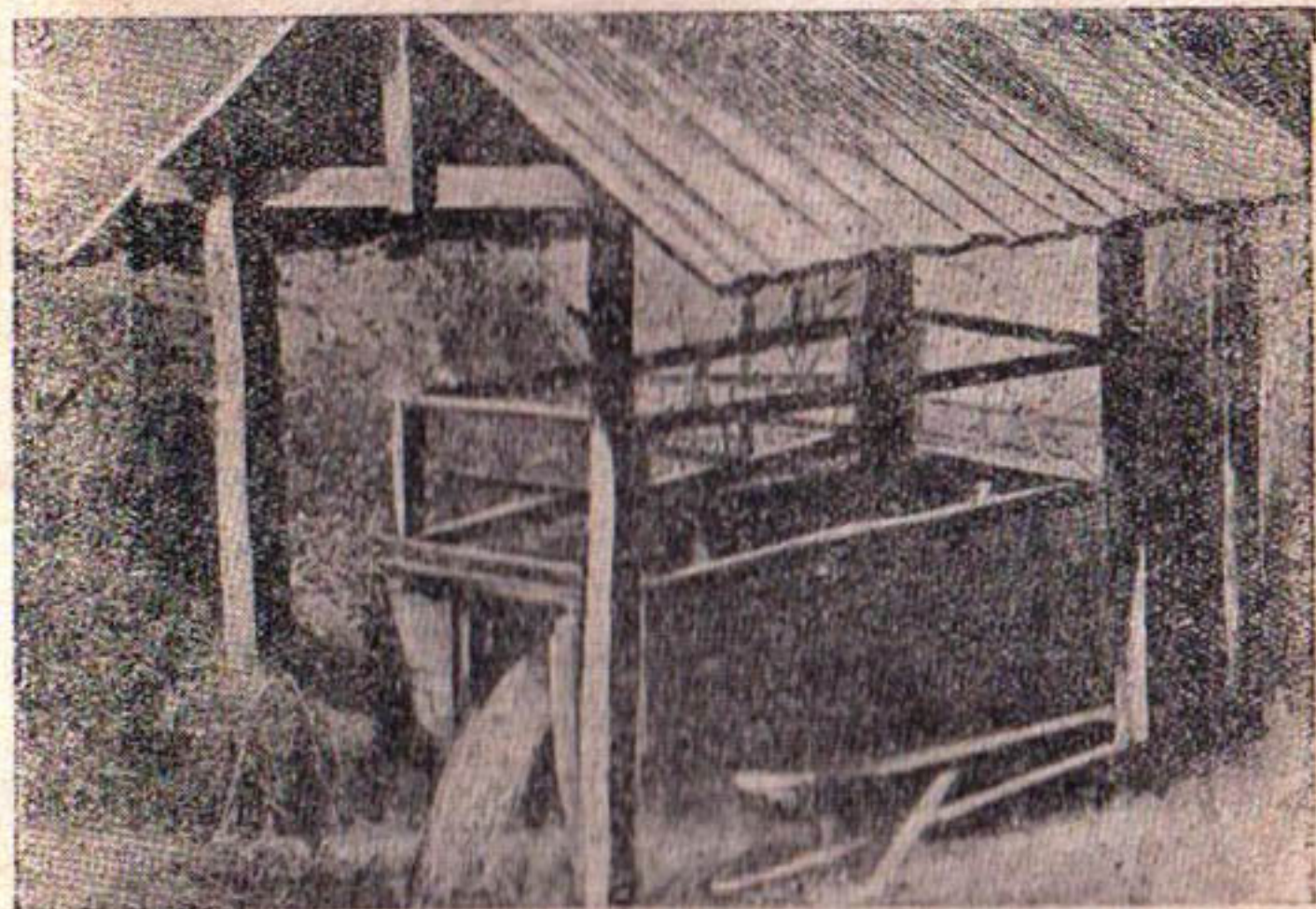


Рис. 39. Водяной реостат.

величин производились через каждые 5 мин. Нагрузка испытуемого агрегата производилась на водяной реостат. Этот реостат, сделанный для испытания турбин при сдаче их в эксплуатацию — в 1926 г., представлял собою деревянный ящик размером в плане $3,00 \times 1,00$ м и высотой 1,0 м и был расположен под деревянным насосом недалеко от здания станции (рис. 38). В ящике на расстоянии 0,85 м друг от друга на изоляторах помещались металлические пластины в количестве 4 шт. трапециевидального сечения. Эти пластины были соединены треугольником с тремя фазами генератора так, что две фазы были присоединены к двум средним пластинам, а одна фаза — к двум крайним. К реостату был сделан подвод воды при помощи $2\frac{1}{2}$ -дюймовых труб из крайнего напорного трубопровода. Отвод воды производился при помощи двух труб $d = 1\frac{1}{2}$ дюйма через отверстия в нижней части ящика.

ную нагрузку до 1200 кВт. При расходе воды через реостат $q = 5 \text{ л/сек}$, при температуре поступающей воды $t_1 = 10^\circ$ и расстоянии между пластинами $b = 85 \text{ см}$ определим удельное сопротивление воды при разных нагрузках по формуле:

$$\rho = \frac{R\omega \cdot 100}{b},$$

где

ρ — удельное сопротивление воды в $\frac{\text{ом} \cdot \text{см}^2}{\text{см}}$;

R — сопротивление на одну фазу $R = \frac{e}{i} = \frac{E}{\sqrt{3} I}$ при $E = 6600 \text{ В}$;

ω — площадь сечения воды между электродами одной фазы в дм^2 ;

b — расстояние между электродами в см .

При $N = 1200$	900	600	290 кВт
$I = 105$	79	52	20 А
$\omega = 2,25$	1,65	2,27	6,50 дм^2
$R = 108$	143	220	600 ом.
$\rho = 286$	277	268	411 $\frac{\text{ом} \cdot \text{см}^2}{\text{см}}$

Это все значения для воды в реостате при температуре в среднем $t = 50^\circ$. Холодная же вода по одному из опытов имеет удельное сопротивление при $N = 600 \text{ кВт}$, $\omega = 3,0 \text{ дм}^2$, $R = 220 \text{ ом}$; $\rho = 780$ по формуле

$$N = \frac{q(t_2 - t_1) 427}{75 \cdot 1,36},$$

где q — расход воды через реостат, равный 5 л/сек ;

t_2 — температура нагретой воды;

t_1 — температура подводящей воды;

N — мощность в кВт.

Определение при разных N значения t_2 дает:

при $N = 1200$	900	600	290 кВт
$t_2 = 68^\circ$	54°	39°	24°

что довольно хорошо совпало с наблюдаемой средней температурой в реостате.

На основе приводимых цифр следует отметить довольно большую электропроводимость воды из ар. Боз-Су, что можно объяснить, повидимому, сравнительно большим содержанием в ней кислот. Химический анализ этой воды указал на содержание в ней следующих химических соединений и элементов в миллиграммах на литр.

$\text{Cl}_1 - 4,5$	} кислот $\sim 178 \text{ мг/л}$	$\text{Na} - 10,6$	} $\sim 58 \text{ мг/л}$
$\text{SO}_4 - 2,16$		$\text{Ca} - 40,2$	
$\text{HCO}_3 - 140,8$		$\text{Mg} - 7,8$	
$\text{SiO}_2 - 11,8$			

Для сравнения величин удельного сопротивления данной воды приводим удельное сопротивление холодной воды Боровенской гидростанции $\rho = 23\,700$, что показывает на чрезвычайно сильные колебания этой величины в воде разных рек, что необходимо учитывать при проектировании водяных реостатов.

Обработка материалов и результаты испытания.

В результате было проведено две серии испытаний.

1. При $H = 12,70$ м (эксплоатационные условия), при $n = 375$ об/мин. и при нагрузках примерно 110; 85; 60; 30% от полной мощности и при холостом ходе.

2. При таких же условиях, но при напоре $H \geq 13,5$ м (гарантийное значение).

Для каждого опыта по полевым материалам были подсчитаны все нужные величины.

Вычисление расхода.

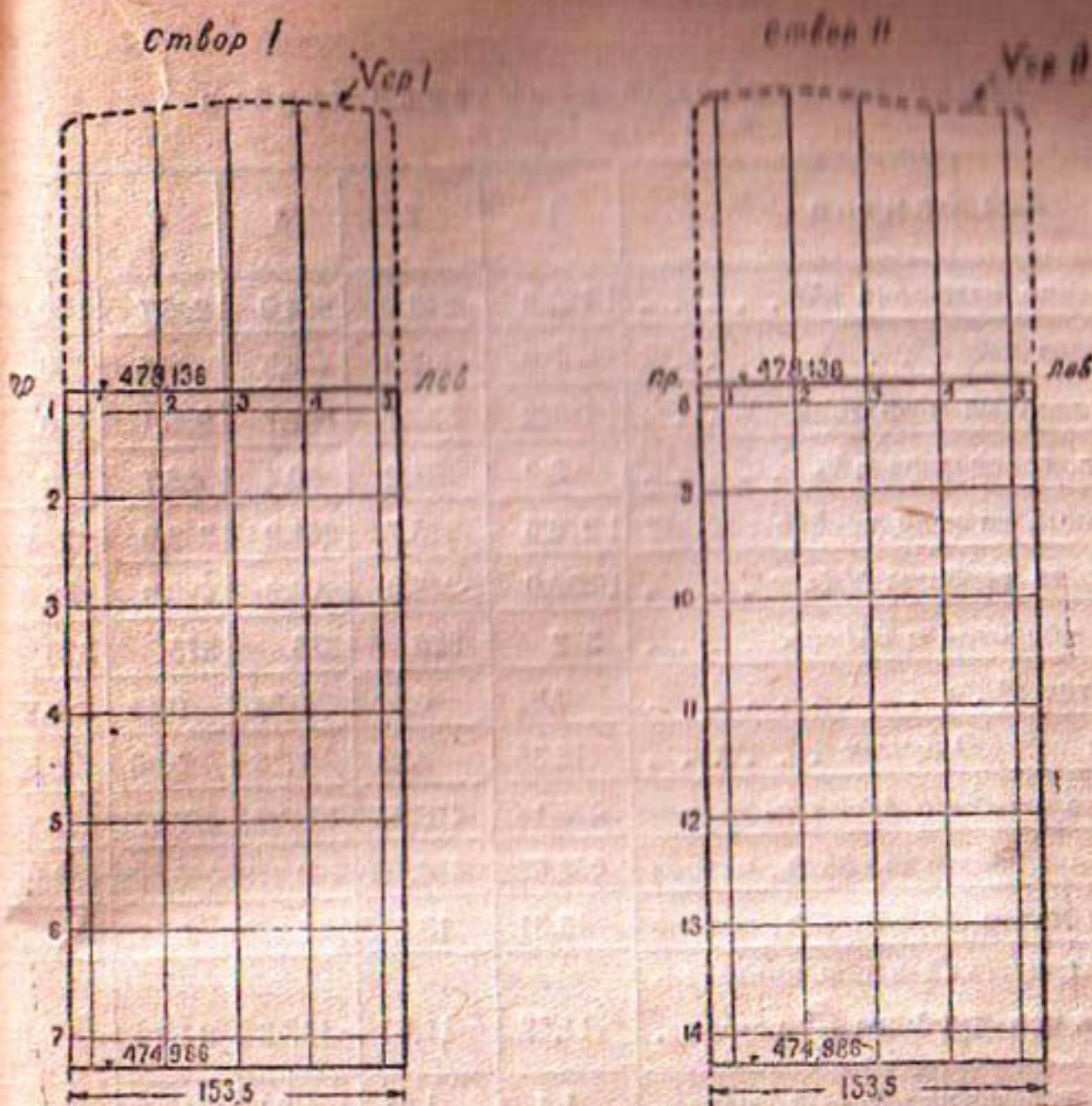
По обработке хронограмм, пользуясь тарировочными кривыми вертушек, вычисляли в каждой точке сечения скорости, по которым строили эпюры скоростей на каждой вертикали, затем эпюры средних скоростей по вертикалям, средние скорости по всему сечению, по которым уже путем планиметрирования определялся расход.

Из рис. 40 ясно виден ход вычислений расхода при опыте № 2 и нагрузке 1200 kW. Следует отметить, что распределение скоростей по сечениям получилось очень равномерное, разницы в расходах через сечение 1 и 2 в каждом опыте получались очень незначительные (рис. 41). Благодаря закрытию среднего пролета шандорами и значительному сужению всего сечения получились даже при холостом ходе значительные скорости 0,30—0,40 м/сек, что для точности измерения гидрометрическими вертушками существенно важно.

Вычисление всех остальных величин.

Величины N kW на валу турбины вычислялись по имеющимся к. п. д. генератора¹⁾ (рис. 42). Мощность, затрачиваемая на масляный насос регулятора, к мощности турбины не прибавлялась. Действительный напор H метров вычислялся, как уже говорилось, по формуле $H = h_0 - h_n + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{C_n^2}{2g}$, где скорость C_n вычислялась по сечению кожуха турбины $D = 2984$ мм. Весь ход вычислений ясно виден в сводных табл. 1 и 2. Значения H получились несколько отличными от заданных из-за колебаний бьефов, разных величин скоростных напоров и пр., а поэтому, пользуясь принципом динамического подобия в применении к работе данной турбины, сделали пересчет величин N , Q и n на напор, в первом

¹⁾ Присланы по специальному запросу заводом.



Распределение скоростей по вертикалям

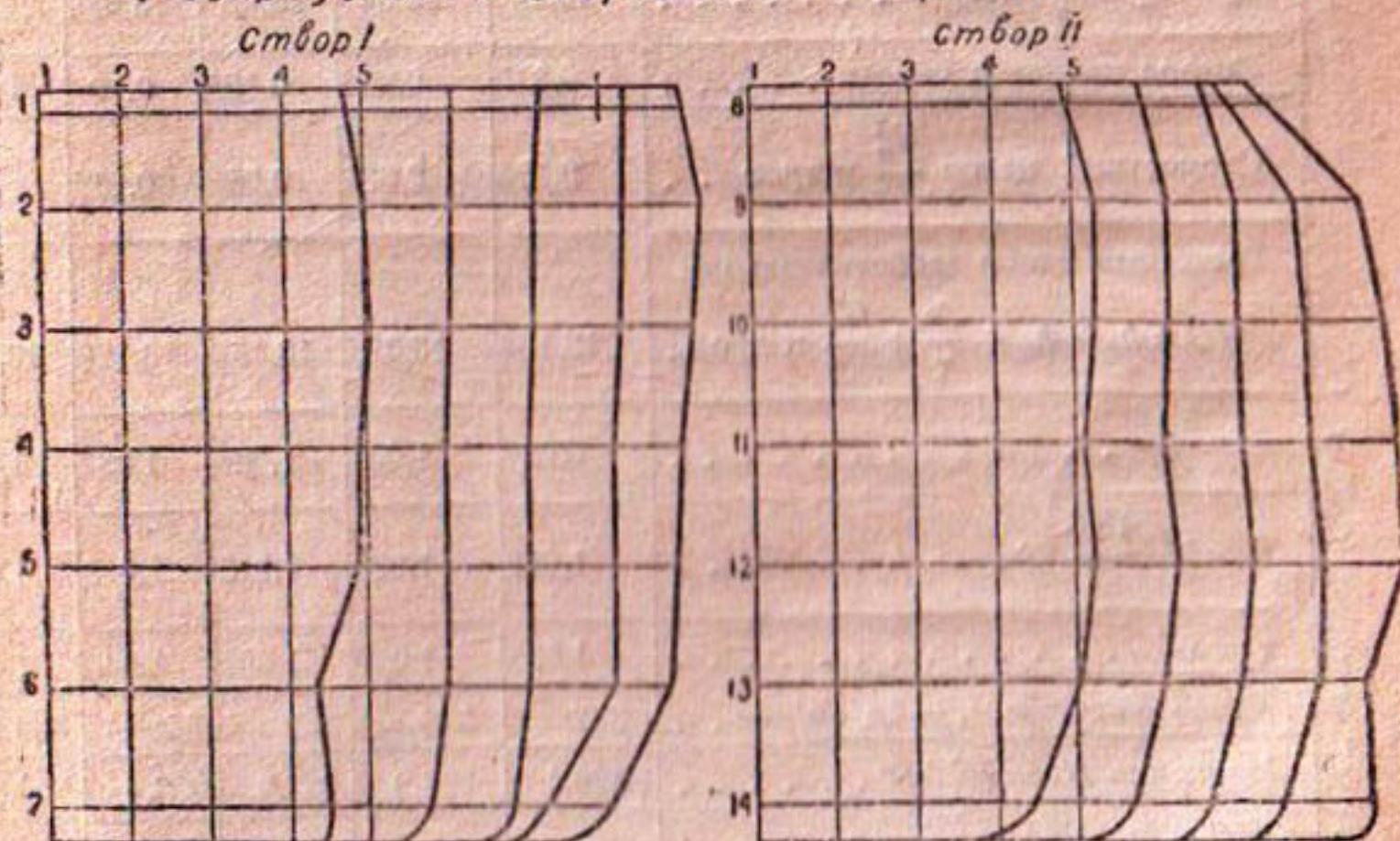


Рис. 40. Результаты замера скоростей. Опыт № 2, нагрузка 1 200 кВт.

Таблица 1

Сводка результатов испытаний турбин
при $H=13,50$ м

№№ опытов		1	2	3	4	5
Нагрузка	Показания ваттметра kW	1 196,2	843,0	604,0	286,7	0
	Поправка kW	—9,0	—7,9	—6,3	—0,6	0
	Исправленные показания kW	1 187,2	835,1	597,7	286,1	0
	К. п. д. генератора η %	93,0	91,2	90,4	83,7	0
	Мощность на валу турбины N kW	1 276,6	915,7	661,2	342,0	39,0
	Мощность турбины N л. с.	1 730,0	1 245,0	900,0	465,0	53,0
	Число оборотов n об/мин.	372	375	375	375	376
	Открытие F	0,81	0,61	0,54	0,43	0,28
	Расход воды Q м ³ /сек	12,35	9,23	7,78	5,96	3,67
Напор	Отметка верхнего бьефа h_0 метров	478,187	478,247	478,227	478,237	478,247
	Отметка нижнего бьефа h_u метров	464,872	464,702	464,972	465,062	464,912
	Напор брутто $H = h_0 - h_u$ метров	13,315	13,545	13,255	13,175	13,335
	Манометрический напор приведенной к оси турбины $\frac{p_0}{\gamma}$ метров .	11,53	11,67	11,73	11,79	11,83
	Высота всасывания $h_0 - h_u$ метров	1,47	1,64	1,37	1,28	1,43
	$h_0 - h_u + \frac{p_0}{\gamma}$ метров	13,00	13,31	13,10	13,07	13,19
	Потери напора h метров	0,315	0,234	0,157	0,107	0,077
	Скоростной напор $\frac{C_u^2}{2g}$ метров . .	0,154	0,086	0,061	0,036	0,014
	Расчетный напор (действительный) $H = h_0 - h_u + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{C_u^2}{2g}$ метров .	13,154	13,396	13,161	13,106	13,204
	$\alpha = \frac{13,5}{H}$	0,026	1,007	1,026	1,030	1,022
Пересчет на напор 13,50 м	$\beta = \sqrt{\frac{13,5}{H}}$	1,013	1,003	1,013	1,015	1,011
	$\gamma = \alpha \cdot \beta$	1,039	1,010	1,039	1,045	1,033
	Число оборотов $n_1 = \beta n$ об/мин . .	377	376	380	381	380
	Мощность $N_1 = \gamma N$ kW	1 326,4	924,9	687,0	357,4	40,3
	Мощность N л. с.	—	—	—	—	—
	Расход $Q_1 = \beta Q$ м ³ /сек	12,51	9,26	7,88	6,05	3,71
	К. п. д. турбины η %	80,2	75,5	66,0	44,8	8,2

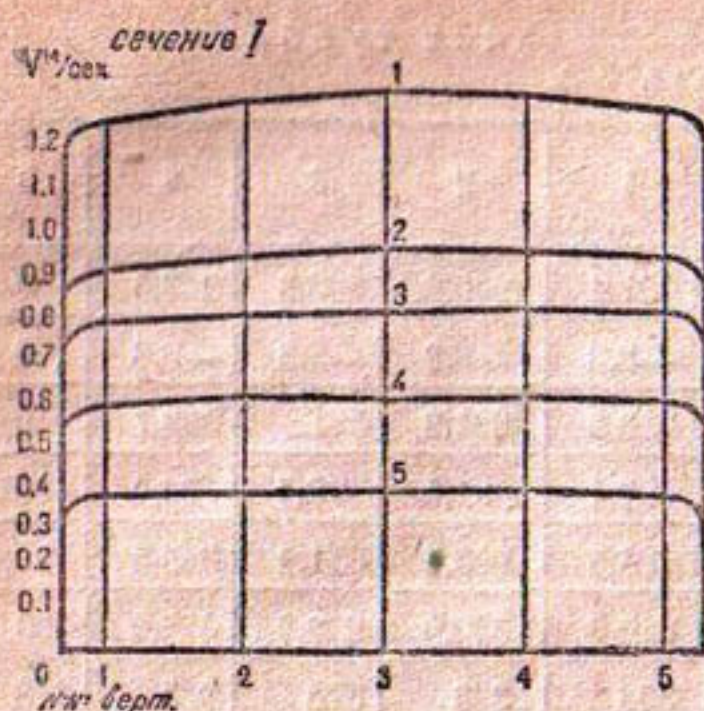
Таблица 2

Сводка результатов испытания турбин
при $H=12,70$ м

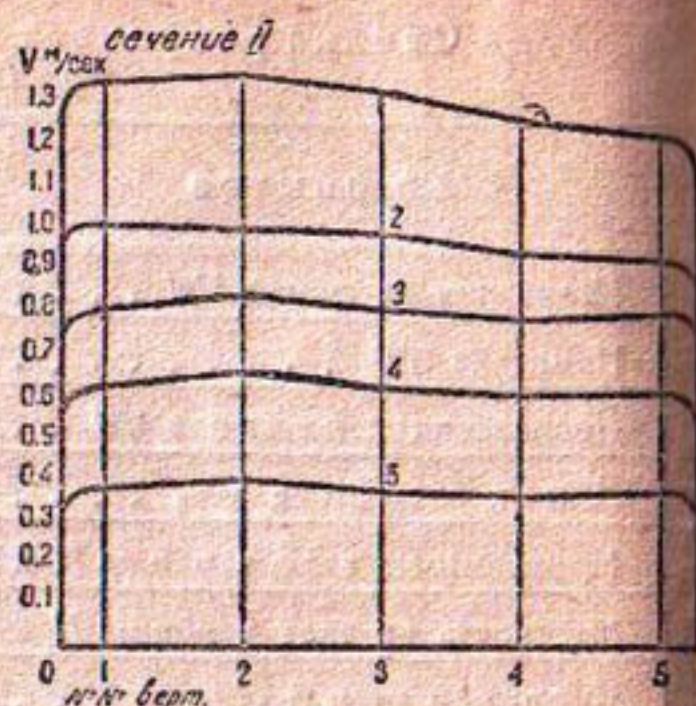
№№ опытов		1	2	3	4	5
Нагрузка	Показания ваттметра kW	1 101,4	900,0	603,3	293,5	0
	Поправка kW	—8,8	—8,2	—6,3	—0,8	0
	Исправленные показания kW	1 092,6	891,8	597	292,7	0
	К. п. д. генератора η %	92,4	91,5	90,4	84,0	0
	Мощность на валу турбины N kW	1 183,5	975,7	671,4	348,5	39,0
	Мощность на валу турбины N kW	1 610,0	1 330,0	912,0	474,0	53,0
	Число оборотов n об/мин.	368	373	375	375	373
	Открытие F	0,81	0,67	0,56	0,45	0,29
	Расход воды Q м ³ /сек	12,22	10,33	8,09	6,20	3,69
	Отметка верхнего бьефа h_0 метров	478,097	478,157	478,197	478,247	478,237
Напор	Отметка нижнего бьефа h_n метров	465,322	465,342	465,342	465,362	465,312
	Напор брутто $H_2 = h_0 - h_n$ метров	12,78	12,82	12,86	12,88	12,93
	Манометрический напор, приведенный к оси турбины $\frac{p_0}{\gamma}$ метров .	11,36	11,58	11,74	11,78	11,87
	Высота всасывания $h_0 - h_n$ метров	1,02	1,00	1,00	0,98	1,03
	$h_0 - h_n + \frac{p_0}{\gamma}$ метров	12,38	12,58	12,74	12,76	12,90
	Потери напора h метров	0,40	0,24	0,12	0,12	0,03
	Скоростной напор $\frac{C_n^2}{2g}$ метров	0,151	0,108	0,066	0,040	0,014
	Расчетный напор (действительный) $H = h_0 - h_n + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{C_n^2}{2g}$ метров .	12,521	12,688	12,806	12,800	12,914
	$\alpha = \frac{12,70}{H}$	1,014	1,001	0,992	0,992	0,984
	$\beta = \sqrt{\frac{12,70}{H}}$	1,007	1,001	0,996	0,996	0,992
	$\gamma = \alpha \cdot \beta$	1,021	1,002	0,988	0,988	0,976
	Число оборотов $n_1 = \beta n$ об/мин	371	373	374	374	370
	Мощность $N_1 = \gamma N$ kW	1 208,4	977,7	663,3	344,3	38,0
	Мощность N_1 л. с.	1 643,4	1 329,7	902,1	468,2	51,7
	Расход $Q_1 = \beta Q$ м ³ /сек	12,31	10,34	8,06	6,18	3,66
	К. п. д. турбины η %	78,8	76,7	65,8	44,8	8,4

Пересчет на напор 12,70 м

Испытание при $H \approx 13,50$ м.

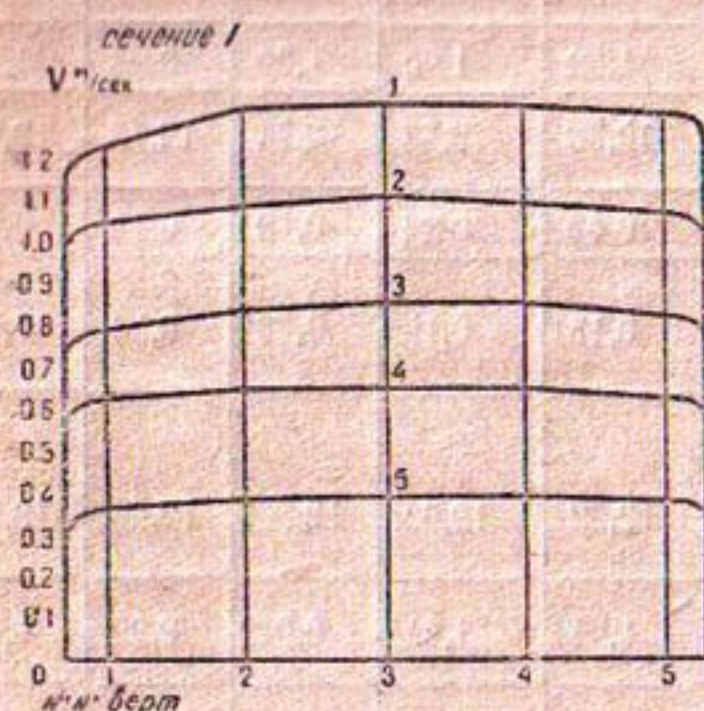


Опыт 1. $N = 1730,0$	$V_{ср I} = 1,275$ м/сек
	$V_{ср II} = 1,215$ "
2. $N = 1245,0$	$V_{ср I} = 0,92$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,95$ "
3. $N = 900,0$	$V_{ср I} = 0,79$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,73$ "
4. $N = 465,0$	$V_{ср I} = 0,592$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,613$ "
5. $N = 53,0$	$V_{ср I} = 0,366$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,357$ "

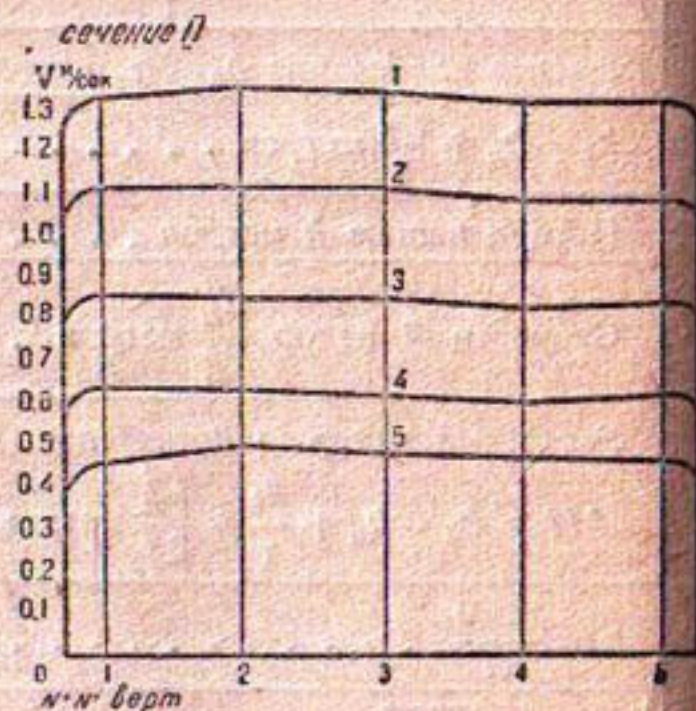


$F = 4,7$ м ³	$Q_I = 6,15$ м ³ /сек	} $Q = 12,35$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 6,20$ "	
	$Q_I = 4,525$ м ³ /сек	} $Q = 9,23$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 4,695$ "	
	$Q_I = 3,89$ м ³ /сек	} $Q = 7,73$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 3,89$ "	
	$Q_I = 2,937$ м ³ /сек	} $Q = 5,955$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 3,018$ "	
	$Q_I = 1,837$ м ³ /сек	} $Q = 3,653$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 1,831$ "	

Испытание при $H \approx 12,70$ м.



Опыт 1. $N = 1610,0$	$V_{ср I} = 1,23$ м/сек
	$V_{ср II} = 1,319$ "
2. $N = 1330,0$	$V_{ср I} = 1,07$ м/сек
	$V_{ср II} = 1,085$ "
3. $N = 912,0$	$V_{ср I} = 0,83$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,823$ "
4. $N = 474,0$	$V_{ср I} = 0,634$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,62$ "
5. $N = 53,0$	$V_{ср I} = 0,374$ м/сек
	$V_{ср II} = 0,367$ "



$F = 4,70$ м ³	$Q_I = 6,016$ м ³ /сек	} $Q = 12,216$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 6,20$ "	
	$Q_I = 5,13$ м ³ /сек	} $Q = 10,53$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 5,20$ "	
	$Q_I = 4,05$ м ³ /сек	} $Q = 8,09$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 4,04$ "	
	$Q_I = 3,135$ м ³ /сек	} $Q = 6,20$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 3,065$ "	
	$Q_I = 1,83$ м ³ /сек	} $Q = 3,636$ м ³ /сек
	$Q_{II} = 1,826$ "	

Рис. 41. Кривые средних скоростей по сечениям.

случае $H=12,70$ м а во втором — $H=13,50$ м, пользуясь следующими зависимостями:

$$\frac{n}{n_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}}; \quad \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}}; \quad \frac{N}{N_1} = \frac{H}{H_1} \sqrt{\frac{H}{H_1}}.$$

В результате нам интересно было получить кривые зависимости Q в функции от N при нормальном числе оборотов и при $H=\text{const}$. Второго условия мы добились, первое же условие не было соблюдено, к. в результате пересчета величины n были получены отклоняющиеся от нормальных на величину $\pm 1,5\%$. Пользуясь универсальной характеристикой подобного колеса, пересчитанного на данные условия (рис. 23), можно видеть, что при таком незначительном отклонении оборотов, изменение к. п. д. может быть не больше $\pm 1,0\%$ в ту или другую сторону. При испытаниях турбин необходимо стремиться к такому варьированию числами оборотов, чтобы при проведении их к одному напору они по возможности точнее совпадали с нормальными, т. е. для этого необходимо проделать несколько пробных испытаний и заранее учесть величины скоростного напора, величину потерь напора для точного учета перед окончательным испытанием величины действительного напора H . По полученным данным были построены графики с кривыми:

$$\eta = f(N), \quad \eta = f(Q); \quad N = f(Q);$$

$$F = f(Q) \text{ (рис. 43).}$$

Для сравнения на указанные графики нанесены также величины гарантий для 4-й турбины, изготовляемой Ленинградским машиностроительным заводом, полученные из универсальной характеристики ¹⁾ подобного колеса.

На основе полученных результирующих данных можно сделать следующие выводы:

1. Если принять кривые, построенные по универсальной характеристике за гарантийные значения ²⁾, то можно сказать, что гарантия не выполнена.

2. Если сравнить полученные значения к. п. д. с к. п. д. для подобных турбин современного изготовления, то можно сказать, что получен-

¹⁾ Прислана Ленинградским машиностроительным заводом с указанием, что тип колеса (№ 13), для которого получены эти характеристики, вполне соответствует колесу Боз-Суйских турбин.

²⁾ Обычно гарантийные значения к. п. д. даются больше, чем полученные при модельных испытаниях.

Кривая к. п. д. генератора

$\eta = 2\%$ $n = 375 \text{ об/мин}$ $\cos \varphi = 1,0$

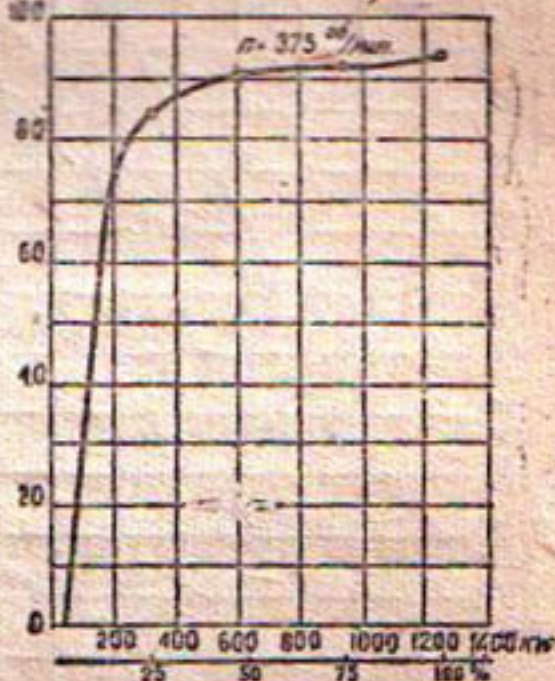


Рис. 42. Кривая к. п. д. генератора.

ные значения к. п. д. довольно низки ($\eta_{\max} = 80,5\%$); для турбин данной мощности максимальный к. п. д. должен был быть $83 - 85\%$, что видно и из гарантии для турбины 4-й.

3. С увеличением напора с 12,70 до 13,50 м при одном и том же расходе происходит незначительное увеличение к. п. д. При максимальных расходах увеличение больше и доходит до 3% , что не находится в противоречии с другими аналогичными турбинами такой же быстроты вращения ($n_s = 347$), у которых при одном и том же открытии и при

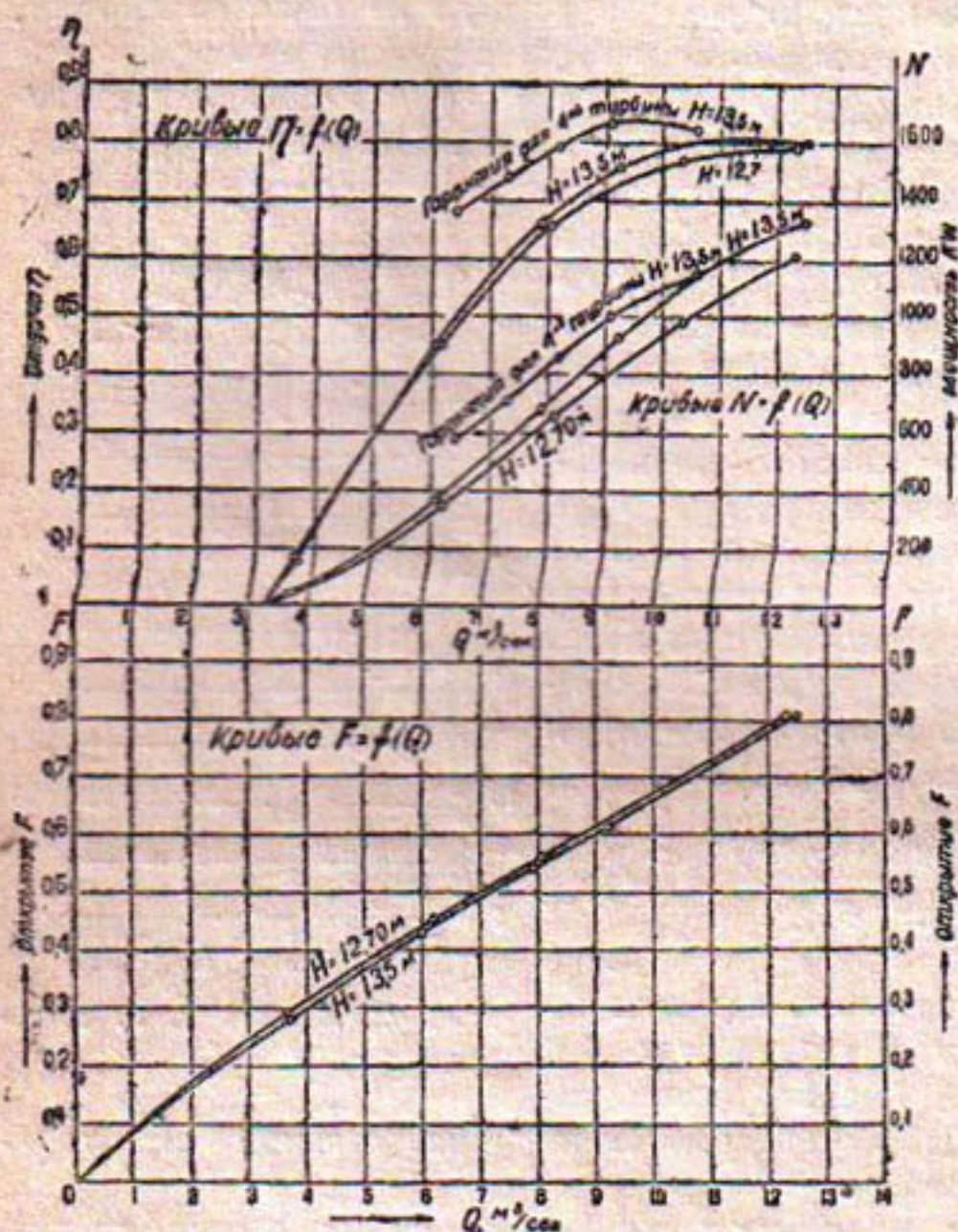


Рис. 43. Результаты испытания.

с отметки 465,268 м до отметки 464,415 м дает увеличение выработки энергии в год:

$$8760 \cdot 100 \cdot 2 = 1\,752\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

что при средней стоимости киловатт-часа 5 коп. составит:

$$1\,752\,000 \cdot 0,05 = 87\,600 \text{ руб. в год}^1).$$

На основе этих приближенных цифр можно разрешить вопрос о выгодности и целесообразности затраты определенных сумм на понижение горизонта воды нижнего бьефа.

¹⁾ При установке 4-го агрегата эта сумма значительно увеличится.

Потеря напора в трубопроводе.

При испытании турбин одновременно с изменением давления ртутным манометром в кожухе турбины, производились измерения горизонта воды в напорной камере. Это позволило нам определить потерю напора от напорной камеры до входа воды в направляющий аппарат.

По предыдущему имеем:

№№ опытов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход	12,22	12,07	10,38	9,23	8,09	7,78	6,20	5,96	3,69	3,07
Скорости	2,72	2,68	2,26	2,05	1,79	1,72	1,37	1,32	0,82	0,815
Потери	0,422	0,320	0,247	0,234	0,100	0,157	0,114	0,107	0,027	0,077

Сопоставим полученные значения h с h_1 , вычисленными теоретически при помощи существующих формул.

Потеря в трубопроводе $D=2,40$ м может быть выражена следующим уравнением:

$$h_1 = (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) \frac{v^2}{2g} + (0,000962 \cdot \frac{v^{1,852}}{D^{1,1667}} \cdot l),$$

где

ζ_1 — коэффициент потери при входе (с раструбом) $= 0,065$;

ζ_2 — " " " закруглении, равный $\sin^3 \frac{Q}{2} + 2 \sin^2 \frac{Q}{2} = 0,05$;

ζ_3 — " " " расширении, равный $0,2 \cdot \left[\left(\frac{F}{F_1} \right)^2 - 1 \right] = 0,29$;

где F — площадь после расширения,

F_1 — площадь перед расширением;

$0,000962 \cdot \frac{v^{1,852}}{D^{1,1667}} \cdot l$ — потеря по длине трубопровода (формула Hazen'a при $c=120$)

Определяя по указанной формуле значения h_1 для имеющихс я выше-значений $v_{ср}$, имеем:

№№ опытов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$v_{ср}$	2,72	2,68	2,26	2,05	1,79	1,72	1,37	1,32	0,82	0,815
$h_{опыт}$	0,422	0,320	0,247	0,234	0,100	0,157	0,114	0,107	0,027	0,077
$h_{теор}$	0,212	0,203	0,146	0,120	0,092	0,076	0,053	0,050	0,020	0,0193

Строя по указанным данным кривые зависимости $h=f(v)$ (рис. 44) для значения h — как вычисленных теоретически, так и полученных при испытании, — отмечаем, что потери напора, полученные при испытании, больше вычисленных примерно на 60%. При аналогичных иссле-

дованиях на других гидростанциях увеличение действительных потерь против вероятных теоретических было определено на Боровенской 18% а на Ленинканской 45%.

Происходит ли это за счет преуменьшения при подсчетах потерь на отдельных участках или неучета некоторых имеющихся потерь — сказать трудно, так как для этого необходимо замерять потери на отдельных участках трубопровода, что проведено не было, так как эта задача в настоящей работе была не основной.

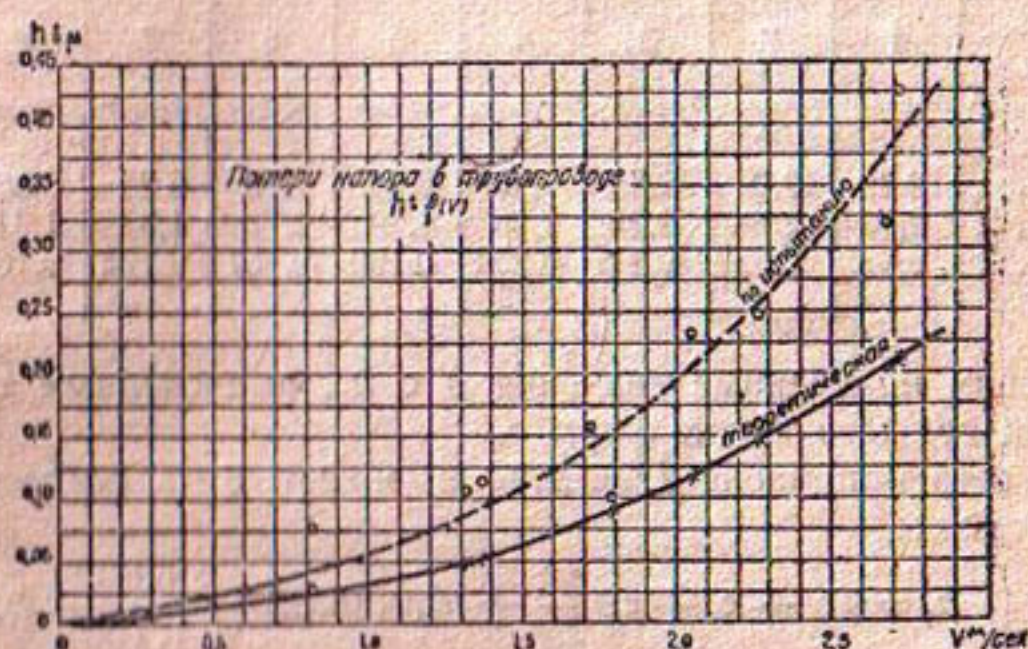


Рис. 44. Потеря напора в трубопроводе.

4. ИСПЫТАНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ.

Общие соображения.

В современных турбинных гидроэлектрических установках, где непрерывным условием удовлетворительной работы турбин является, если не полная неизменность числа оборотов, то во всяком случае сильное ограничение его изменений, регуляторы скорости являются весьма важной и ответственной частью турбины. Эта неизменность числа оборотов необходима не так для самой турбины, как для нормальных условий работы тех машин, орудий или машин, вырабатывающих электрическую энергию, которой они приводятся в движение.

Так как изменение скорости вращения турбины может происходить от нарушения равновесия между притоком к турбине энергии и ее расходом на полезные и вредные сопротивления, то, следовательно, регулятор и должен, реагируя на эти нарушения равновесия, поддерживать все время определенное число оборотов постоянным или с отклонением от него на заранее заданную величину в зависимости от потребителя, обслуживаемого данной установкой.

Причиной, нарушающей указанное равновесие, обычно является изменение полезной нагрузки турбины, которое может происходить в минимальное время (аварии, выключения отдельных абонентов и пр.) и в очень больших пределах. Следствием этого является неизбежное кратковременное изменение числа оборотов, которое делается нормальным после восстановления равновесия. Равновесие достигается путем

изменения расхода воды, протекающей через турбины, — изменением открытия направляющего аппарата.

Максимальные величины этих кратковременных изменений числа оборотов обычно гарантируются заводом и в эксплуатационных условиях проверяются заказчиком.

Кроме этого существенным фактором, определяющим работу регулирования, является время выполнения регулятором полной операции регулирования при изменениях нагрузки.

Расценивая работу регулятора с точки зрения процесса изменения скорости вращения турбины, казалось бы, необходимо стремиться к возможному сокращению продолжительности этой операции, так как существующий в течение затрачиваемого на нее времени перевес притока энергии над ее расходом или, наоборот, недостаток должны сопровождаться изменением числа оборотов, а ради борьбы с этим явлением и устраивается регулятор скорости. Фактически же сокращение времени регулирования, т. е. при быстром изменении нагрузки быстрое закрывание или открывание направляющего аппарата, встречает противодействие со стороны сооружений, подающих воду к турбине, так как быстрый переход воды в подводящих сооружениях от одного режима к другому сопряжен с соответствующим быстрым изменением живой силы этих масс воды, т. е. с гидравлическими ударами в концевых, ближайших к турбине водоводах, особенно опасными для прочности длинных, закрытых, подводящих воду трубопроводов.

Следовательно, в каждом отдельном случае к регулятору должны предъявляться особые требования в зависимости от рода нагрузки данной станции, общей схемы подвода к ней воды и пр.

В данном частном случае в задачу исследования работы регулятора входило только определение кратковременных изменений числа оборотов турбины при различных внезапных изменениях, нагрузках и разгрузках турбины, т. е. проверка гарантии. Но так как имевшийся прибор (тахограф Нопп'а) дал возможность заснять как величину изменения числа оборотов, так и величину открытия в зависимости от времени, то в дальнейшем постараемся кратко осветить и второй основной вопрос, т. е. время регулирования.

Производство испытания.

Для испытания был выбран регулятор испытуемой турбины фирмы Fritz Neumeyer, находившийся в работе с 1926 г. Производство испытаний заключалось в следующем: агрегат с испытуемым регулятором нагружался на водяной реостат до намеченной нагрузки, которая затем моментально сбрасывалась при помощи масляного выключателя. Одновременно при помощи тахографа производилось наблюдение за изменением числа оборотов турбины и закрытием направляющего аппарата в функции времени. Тахограф Нопп'а (рис. 45) представляет собой прибор, снабженный движущейся лентой и тремя перьями, одно из которых при помощи особой передачи было соединено с валом турбины и записывало на ленте изменение числа оборотов; второе — при помощи осо-



Рис. 45. Тахограф.

бой передачи присоединено к штоку сервомотора и записывало на ленте изменения открытий направляющего аппарата, и третье было соединено с электрическим прерывателем тока и записывало на ленте время.

Сбросы нагрузки для испытания были равны примерно 100; 50; 25% от полной мощности турбины. То же самое было проделано и при внезапной нагрузке агрегата на 50 и 25% от полной мощности турбины.

В результате были получены тахограммы, представленные на рис. 46, все данные с которых сведены в нижеследующую таблицу:

№№ опытов	Изменение нагрузки на валу турбины в л. с. ΔN	ΔN в % от полной мощности турбины	Отклонение числа обо- ротов от норм. в % Δn	Время закрытия регулятора в сек. T	Оставшиеся изменения числа обо- ротов в % от норм. Δn_1
--------------	---	--	---	---	---

Внезапная разгрузка

1	— 1282	86,0	+ 6,8	1,2	+ 0,8
2	— 832	55,0	+ 4,9	1,9	+ 0,3
3	— 427	28,5	+ 3,3	2,5	+ 0,1

Внезапная нагрузка

4	+ 832	55,0	— 4,0	2,0	— 0,1
5	+ 427	28,5	— 2,6	2,3	— 0,1

На основе полученных данных были построены кривые $T=f(\Delta N)$ и $\Delta n=f(\Delta N)$ (рис. 47 и 48), по которым найдены значения этих величин при $\Delta N=100; 50; 25\%$, считая, что величина оставшегося изменения числа оборотов Δn_1 остается без изменения.

Полученные вновь данные сведены в нижеследующую таблицу, где приведены также и гарантийные значения.

№№ опы- тов	$\Delta N =$ $(N_2 - N_1)$	ΔN в % от полн. мощности N	Δl в % от l норм.	Время T	Δl_1 в % от l норм.	Гарант. значен. Δl в % от l норм.
-------------------	-------------------------------	---	--------------------------------	--------------	----------------------------------	--

Внезапная разгрузка

1	1 500	100	+ 8,0	0,90	+ 0,8	+ 12,0
2	750	50	+ 4,5	2,00	+ 0,3	+ 5,0
3	375	23	+ 3,0	2,70	+ 0,1	+ 2,5

Внезапная нагрузка

4	750	50	- 3,75	2,10	- 0,1	- 5,0
5	375	25	- 2,40	2,40	- 0,1	- 2,5

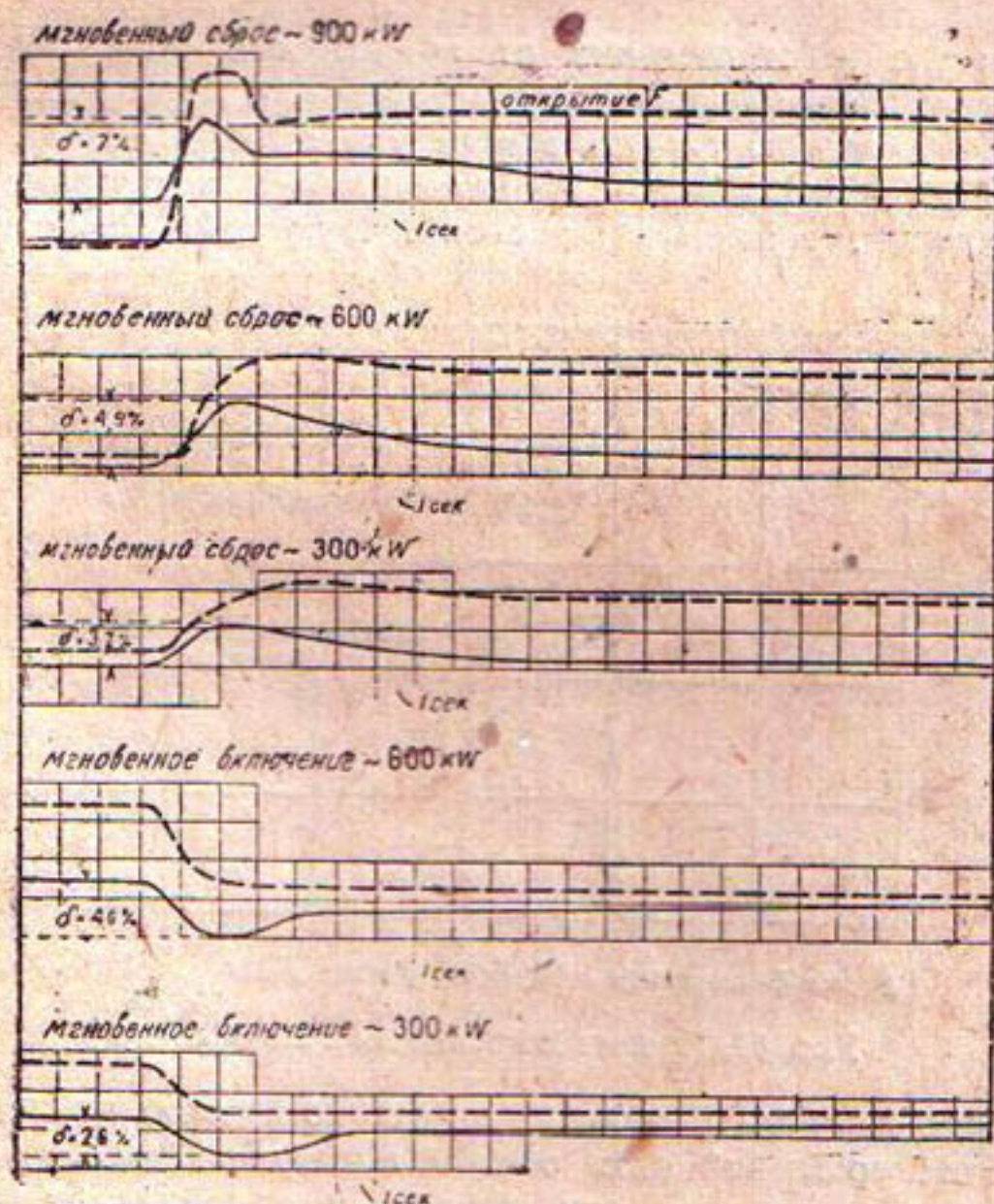


Рис. 46. Тахограммы.

Из таблицы видно, что только при сбросе 25% нагрузки гарантии невыполнена на 0,5%. При изменении же нагрузки от 40 до 100% действительное изменение числа оборотов от нормального (рис. 47) гораздо меньше гарантийных значений. Такие незначительные отклоне-

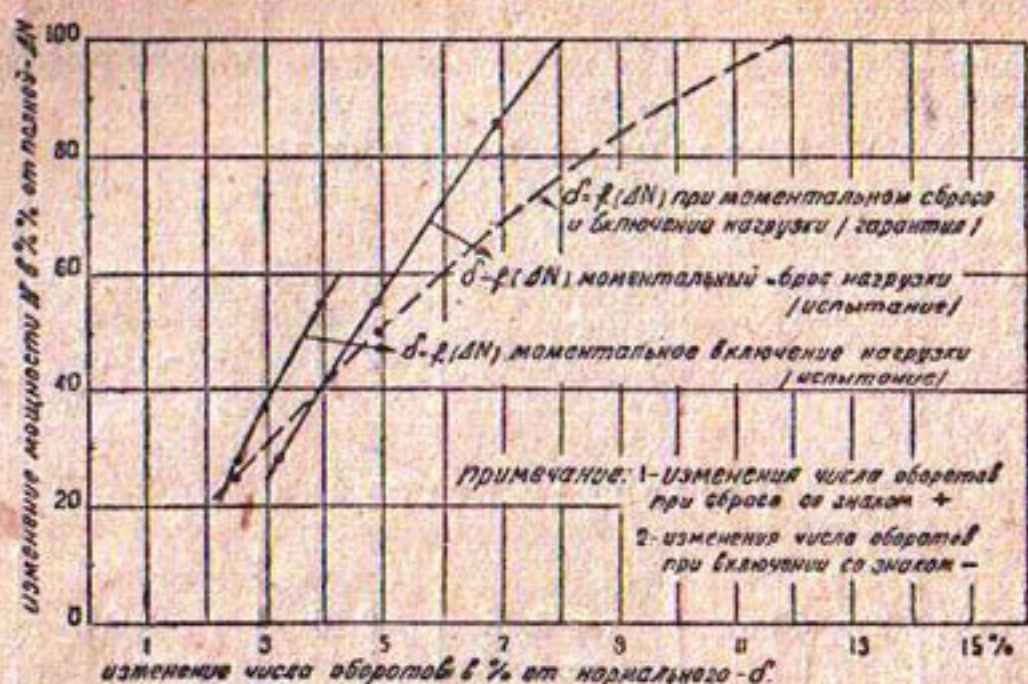


Рис. 47. Кривые зависимости $\delta = \varphi(\Delta N)$.

ния величин Δn действительных от гарантийных существенного значения для нормальной эксплуатации не имеют, а потому с этой точки зрения регулятор можно считать вполне удовлетворительным.

Постараемся теперь кратко проанализировать полученные по тахограммам величины, сравнивая их с существующими теоретическими и

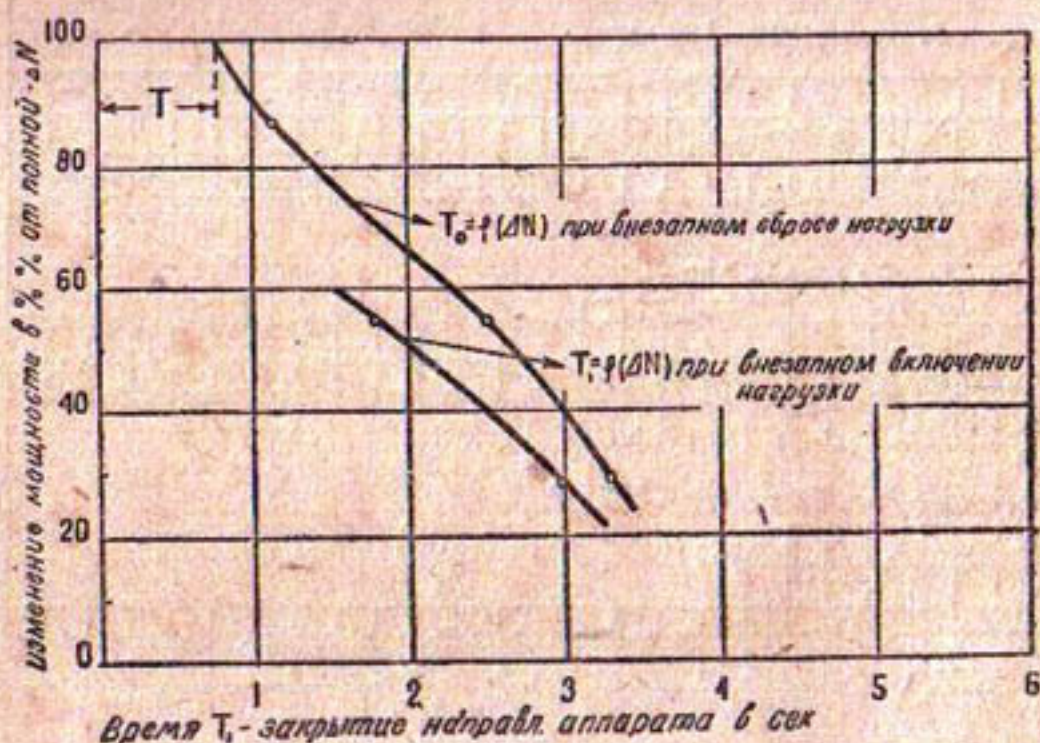


Рис. 48. Кривые зависимости $T = \varphi(\Delta N)$.

эмпирическими данными с двойкой целью, во-первых, для того, чтобы на основе этих сравнений дать общую оценку регулятору, во-вторых, чтобы показать, насколько эти данные подтверждаются в частном случае.

Основные требования, которые должны предъявляться к современным регуляторам, следующие:

1. Необходимо, чтобы чувствительность регулятора была возможно большей, т. е. чтобы t_1 (мертвое время) — промежуток времени между изменением нагрузки (или числа оборотов) и началом прикрывания направляющего аппарата — было по возможности малым, так как время t_1 характеризует нечувствительность отдельных частей регулятора.

В современных регуляторах время t_1 находится в пределах от $1/5$ до $1/10$ сек. Иногда чувствительность регулятора определяют также величиной отклонения за время t_1 числа оборотов n , от нормального числа оборотов в процентах; это отклонение принимается от 0,5 до 1,0% и при всех изменениях нагрузки остается примерно постоянным.

В нашем случае (рис. 46) величина t_1 имеет значение от 0 до 0,2 сек., что показывает на достаточно хорошую чувствительность регулятора.

2. Необходимо, чтобы величины кратковременного изменения числа оборотов в процентах от нормального, Δn , а также и остающееся изменение Δn_1 , не превосходили гарантийной величины и были по возможности величинами малыми.

С гарантийными значениями сравнение мы уже проводили; приведем теперь некоторые данные о допускаемых колебаниях числа оборотов при относительном колебании нагрузки в пределах ± 100 ; ± 50 ; $\pm 25\%$, по некоторым литературным источникам¹⁾, применительно к данному частному случаю при средних требованиях.

ΔN в %	-100%	+100%	-50%	+50%	-25%	+25%
Δn в % от n	10—16	—	4—5,5	4—6,5	2—3,5	2—4
Δn_1 в % от n	2,0	—	1,0	1,0	0,5	0,5

При сравнении указанных данных с полученными можно сказать, что данный регулятор вполне удовлетворяет современным требованиям.

3. Необходимо, чтобы время закрытия направляющего аппарата при внезапных изменениях нагрузки было в соответствии с длиной трубопровода. Закрытие турбины, как мы уже указывали, неизбежно сопровождается повышением давления в конце трубопровода, которое с весьма большой скоростью (около 1000 м/сек) распространяется вдоль трубы к ее началу; достигнув напорного резервуара с постоянным (атмосферным) давлением, волна повышенного давления отразится и распространится по трубе вновь в обратном направлении. Если длина трубы такова, что отраженная отрицательная волна начавшегося увеличения давления успеет вернуться к турбине раньше окончания процесса при-

¹⁾ Саткевич — Гидравлические двигатели, стр. 480, данные Wagenbach'a, Gibson'a, Holl'a и Treiber'a; Холь и Глунк — Гидроэлектрические станции.

крывания ее, то она в результате ослабит происходящее увеличение давления и сделает его менее интенсивным.

Отсюда следует, что, чем длиннее трубопровод, т. е. чем позже волна удара вернется обратно к закрываемому отверстию, тем медленнее должно происходить закрывание турбины для устранения больших давлений, т. е. время

$$T_1 = \frac{2L}{a},$$

где L — длина трубопровода;

a — скорость распространения удара, равная 1000 м/сек;

T_1 — время прохождения удара по длине трубопровода вперед и назад должно быть меньше T — времени закрытия направляющего аппарата.

В нашем случае при $L_2 = 27$ м и наименьшем значении величины $T = 0,8$ сек:

$$T_1 = \frac{2 \cdot 27}{1000} = 0,054 \text{ сек} < T,$$

т. е. требование в данном случае вполне удовлетворяется.

4. Считаясь еще с серьезным последствием разрушения трубопровода при больших напорах, часто рассуждают допускаяемое колебание в них давления при данном времени закрытия направляющего аппарата с величиной напора, а именно считают приемлемым при напорах H до 50 м иметь $\frac{\Delta H}{H}$ до 0,50, причем $\frac{\Delta H}{H}$ (где ΔH повышение напора при закрытии направляющего аппарата) определяется из следующей зависимости:

$$\frac{\Delta H}{H} \cong 0,13 - 0,15 \frac{L \Delta v}{HT},$$

где Δv — разность между скоростями в трубопроводе при полной нагрузке и холостом ходе.

В нашем случае при $T = 0,8$ сек $\Delta v = 1,45$ м/сек:

$$\frac{\Delta H}{H} = 0,14 \frac{27 \cdot 1,45}{13,5 \cdot 0,8} = 0,51,$$

т. е. в данном случае $\frac{\Delta H}{H}$ несколько выше рекомендуемой, так как слишком мало время T .

Следовательно, с этой точки зрения, можно как будто сказать, что в данном случае, в целях уменьшения величины $\frac{\Delta H}{H}$, а следовательно и удешевления трубопровода, можно было бы допустить некоторое удлинение продолжительности закрытия. В современных установках с турбинами закрытого типа без регуляторов давления при $L \leq 2H$ (данный случай) принимают обычно величину T равной от 1,5 до 3 сек.

5. В тесной связи с трубопроводом, а именно с возникающими в нем колебаниями давления, стоит необходимость снабжения турбин определенными инерционными массами, т. е. для хорошей регулировки необходимо, чтобы вращающаяся вместе с рабочим колесом и связанная с ним в одно целое масса (ротор генератора, маховик) имела вполне определенный, но не излишний момент инерции по отношению к оси вращения, и для увеличения времени закрытия необходимо увеличивать и маховые массы. На основе простых теоретических рассуждений можно вывести следующие приближенные зависимости:

$$GD^2 = A \frac{N_{\max} \alpha^2 T}{n^2 \delta}, \quad (1)$$

где A — числовой коэффициент, равный 134,200;

N — максимальная мощность в л. с.;

α — коэффициент изменения нагрузки в долях от $N_{\max}$;

T — время закрытия при сбросе полной мощности;

n — нормальное число оборотов;

δ — коэффициент неравномерности, т. е. отношение:

$$\frac{\Delta n}{n - \Delta n};$$

где Δn — временное изменение числа оборотов;

G — вес вращающихся масс;

D — диаметр вращающихся масс;

GD^2 — маховой момент.

Для данного случая величина махового момента будет в свою очередь равна:

$$GD^2 = (GD)_1^2 + (GD)_2^2 = 31\,500 + 13\,450 = 449\,500 \approx 450\,000 \text{ кг/м}^2,$$

где $(GD)_1$ — маховой момент махового колеса при диаметре его 2,8 м и весе 4000 кг;

$(GD)_2$ — маховой момент ротора генератора (величина последнего принята согласно заводским испытаниям).

Вставляя в формулу (1) все ранее полученные величины, определим потребный маховой момент при $\alpha = 1$:

$$GD = A \frac{1500 \cdot 0,8}{375^2 \cdot 0,08} = A \cdot 0,107 = 14,400 \text{ кг/м}^2.$$

Уравнение (1) выведено без учета мертвого времени и без учета влияния трубопровода. При учете же влияния трубопровода (удара) мы имеем приближенную формулу:

$$GD^2 \approx K_1 \frac{TN}{\delta_{25} n^2} \left(1 + K_2 \frac{L \Delta v}{HT} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

где $K_1 \approx 1\,450\,000$; $K_2 = 0,27$;

δ_{25} — коэффициент неравномерности при сбросе 25% нагрузки.

Подставляя в формулу (2) все величины, получим:

$$GD^2 = 1\,450\,000 \frac{0,8 \cdot 1500}{3 \cdot 375} \left(1 + 0,27 \frac{27 \times 1,45}{H I} \right)^{\frac{3}{2}} = 11\,500 \text{ кг/м}^2.$$

В действительности же маховой момент равен $45\,000 \text{ кг/м}^2$, т. е. гораздо больше вычисленных по формуле (1) и (2). При достоверности приводимых формул это расхождение может быть, во-первых, от неточности данных величин махового момента ротора генератора, во-вторых, от неправильности числовых коэффициентов AK_1 и K_2 , которые могут быть уточнены, конечно, только, в лабораторных условиях или на опытной установке.

В общем, дальнейшие исследования регуляторов, по нашему мнению, не должны ограничиваться только проверкой гарантийных неравномерностей; эти исследования должны быть глубже и шире, чтобы на основе их можно было ближе подойти к анализу работы автоматического регулятора и увязки ее с работой трубопровода маховых масс и самой турбины.

Для этого нужны при исследованиях: 1) заснятие тахограмм оборотов и открытия для разнообразных случаев изменения нагрузок, 2) замер изменения давления в трубопроводе у турбины, 3) точное значение махового момента вращающихся масс.

Задача исследования работы регуляторов на гидростанциях теперь является особо актуальной, так как Ленинградский турбостроительный завод расширяет свое производство регуляторов и будет ими снабжать все турбины как своего производства, так и производства Московского завода. Исследования регуляторов на гидростанциях, увязанные с заводом-производителем, должны вести и к их усовершенствованию и к наиболее рациональному их применению.

ПРЕДИСЛОВИЕ

(к статьям проф. Н. М. Шапова).

Водная энергия участвует все в большей и большей доле в энергетическом хозяйстве СССР. Учет результатов, достигнутых строительствами новых гидростанций, и наблюдение за их эксплуатацией являются насущными задачами в целях улучшения их эффективности.

Выпускаемые отчеты по произведенному исследованию двух гидростанций, очень отличных друг от друга, касаются как раз этих двух вопросов определения качества турбин крупной горной новой Ленинканской гидростанции и выяснения недостатков маленькой, равнинной, старой гидростанции Милятинской.

С одной стороны, наше молодое, но шагающее крупными шагами турбостроение нуждается в компетентном исследовании его продукции в эксплуатационных условиях; с другой — многочисленные мелкие гидростанции типа Милятинской нуждаются в периодическом за ними наблюдении компетентных гидротехнических учреждений во избежание потери на них крупной доли энергии.

Эти два положения устанавливают и целесообразность этих двух работ и их опубликования, и не последнее их место среди других аналогичных работ гидросектора б. Института сооружений, ныне включенного в Институт „Водгео“, производившихся по программам более широким и на гидростанциях более крупных — Эриванской, Боз-Суйской, Сызранской и других, — отчеты об исследовании которых частью опубликованы, частью находятся в печати.

Дирекция Института „Водгео“.

Проф. Н. М. Шапов.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕНИНАКАНСКОЙ ГИДРОСТАНЦИИ.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Гидротехнический сектор Государственного института сооружений (ныне входящий в состав Института „Водгео“) с 1928 г. начал исследования гидроэлектрических станций СССР. Первое исследование Боровенской гидростанции было произведено сектором в 1928/29 г. по инициативе самого Института (сообщение Института № 20). В июне 1929 г. сектор был привлечен Высшим советом народного хозяйства Армении для участия в приемных испытаниях турбин Ленинанканской гидростанции.

В качестве экспертов в приемную комиссию сектором были командированы инж. Н. М. Шапов и А. А. Ничипорович, при деятельном участии которых и были произведены 6—11 июня испытания, описываемые ниже.

2. ЛЕНИНАКАНСКАЯ ГИДРОСТАНЦИЯ ИМ. С. К. ОРДЖОНИКИДЗЕ.

Характер гидростанций Армении определяется: высокогорной местностью (отметки над уровнем моря Ленинанканских турбин—1500, Эриванских—около 1000, Дзорагетских—900 м), большим количеством осадков (в бассейне р. Дзорагета 500—1200 мм в год) при малом, однако, развитии ледников и озер, крупными уклонами рек, грунтами из крепких изверженных пород, малым еще развитием промышленности и часто параллельным использованием воды—энергетическим и на орошение. Все эти особенности характерны и для Ленинанканской гидростанции.

Гидростанция расположена при выходе в ленинанканскую долину (подостланную под очень тонким слоем почвы базальтовыми туфами) р. Арпачая, в 12 км от г. Ленинанкана (рис. 1). Здесь река вымыла глубокое (свыше 100 м) ущелье с уклоном около 4‰ (рис. 2 и 3).

В 1922—1925 гг. был сооружен Ширакский канал им. В. И. Ленина, орошающий долину (М. И. Евдокимов-Рокотовский—Ширакский канал, Вестник ирригации, № 1, 1928, стр. 29). Он забирает воду

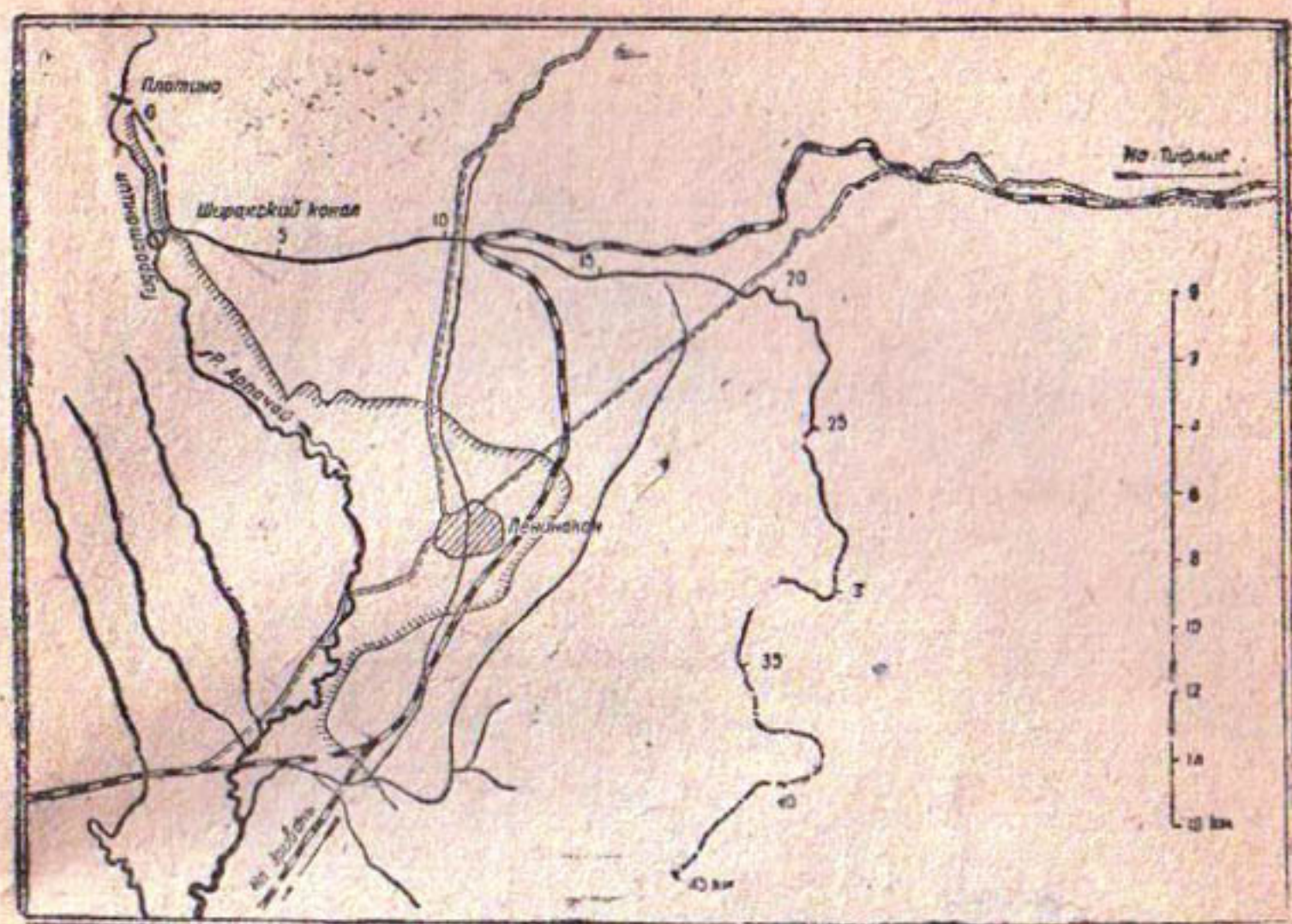


Рис. 1. План местности.

головным сооружением, состоящим из плотины бутовой кладки (рис. 4) с промывным шлюзом и тоннельного отверстия. Тоннель (рис. 5) состоит из трех звеньев общей длиной 2550 м с тремя песколовками и промывными шлюзами. Он в состоянии пропускать до $9 \text{ м}^3/\text{сек}$ при скорости до $2,2 \text{ м}/\text{сек}$.

Тоннель выводит воду на поверхность долины (рис. 6) при отметке последней около 1662 м. Здесь канал разделяется на ветви: оросительную левую и силовую правую, которая и подводит воду к гидростанции, построенной в 1926—1928 гг. (более подробное описание ее см. С. Тер-Минасян и В. Панов, — Ленинанская гидроэлектрическая станция, Известия Государственного электротехнического треста, № 1—2, 1928, стр. 22). Оросительный канал в состоянии пропустить весь расход тоннеля, орошению подлежит 14 000 га нетто.

В водodelителе (рис. 7) имеются щиты С и D, решетка E и обрат-



Рис. 2. Ущелье р. Арпаçая вверх от гидростанции.

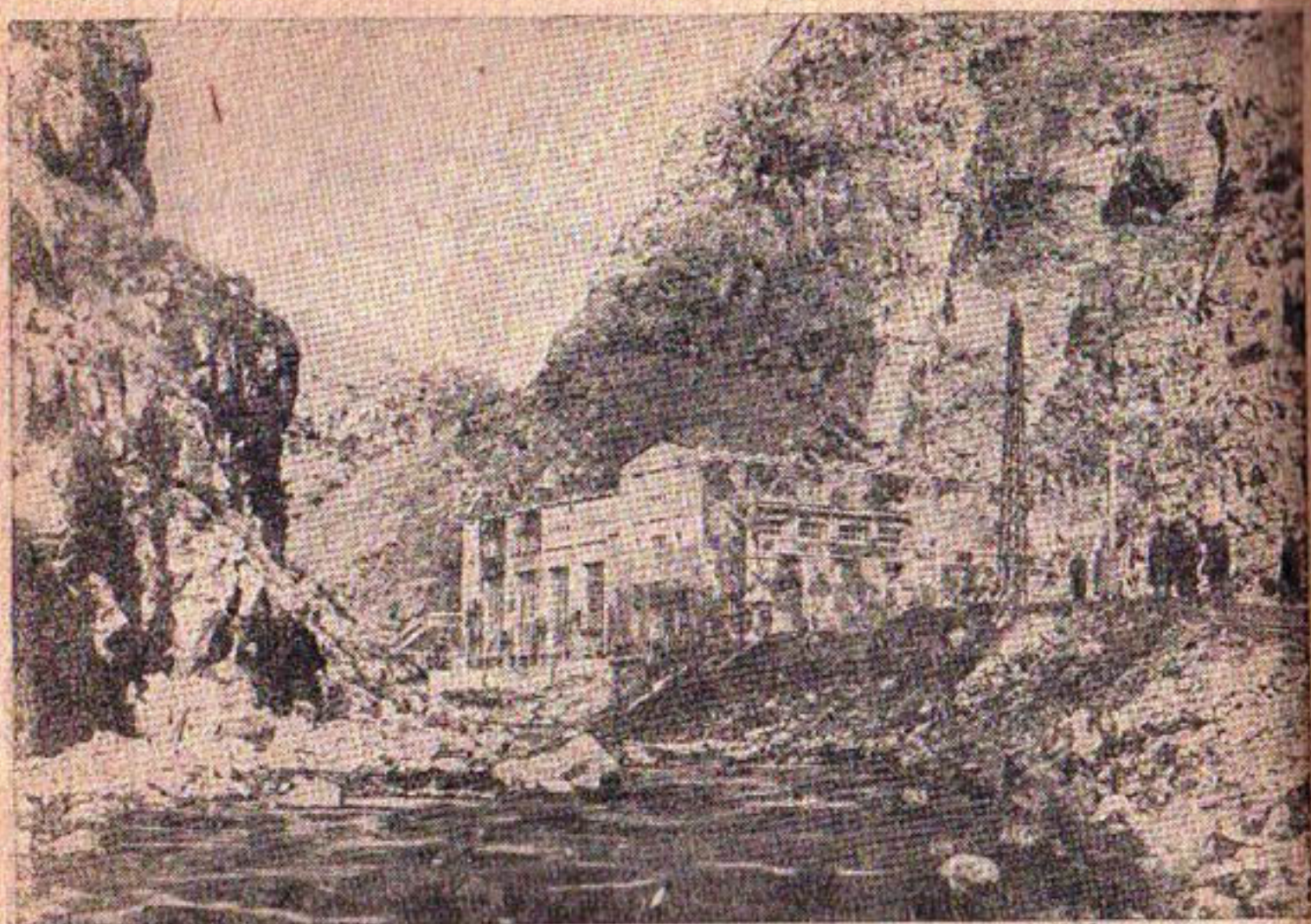


Рис. 3. Вид на машинное здание снизу.

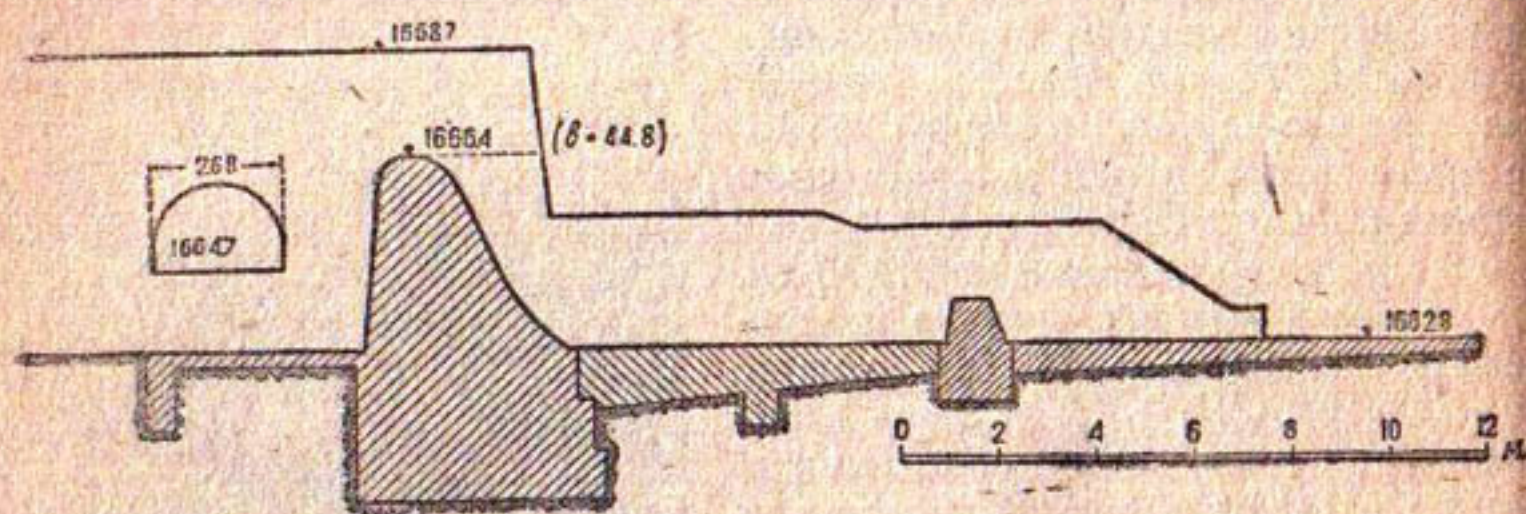


Рис. 4. Плотина.

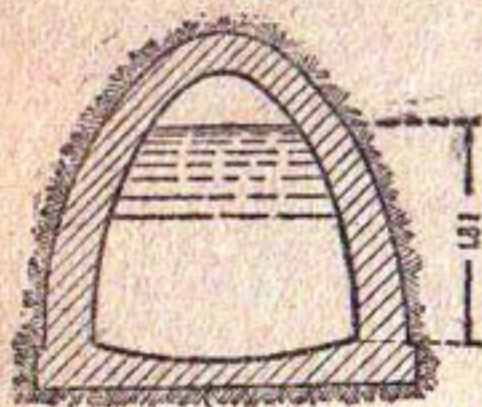


Рис. 5. Тоннель.

ный боковой водослив *G*. Участок *FD* — бетонный с вертикальными стенками и немного вогнутым дном. Дальнейший участок *DH* и далее до бассейна — бетонный трапециoidalного сечения, способный пропустить до $7 \text{ м}^3/\text{сек}$. Бассейн (рис. 8) имеет размеры в плане $18 \times 85,5 \text{ м}$ и служит для суточного регулирования.

В конце бассейна имеются 2 водонапорные камеры (рис. 9). Одна из них пока за-

глушена, а из второй выходит железный напорный трубопровод с внутренним диаметром 1,2 м; продольные швы сварные, поперечные — отогнутые фланцы, склепанные между собою. Длина трубопровода до раз-

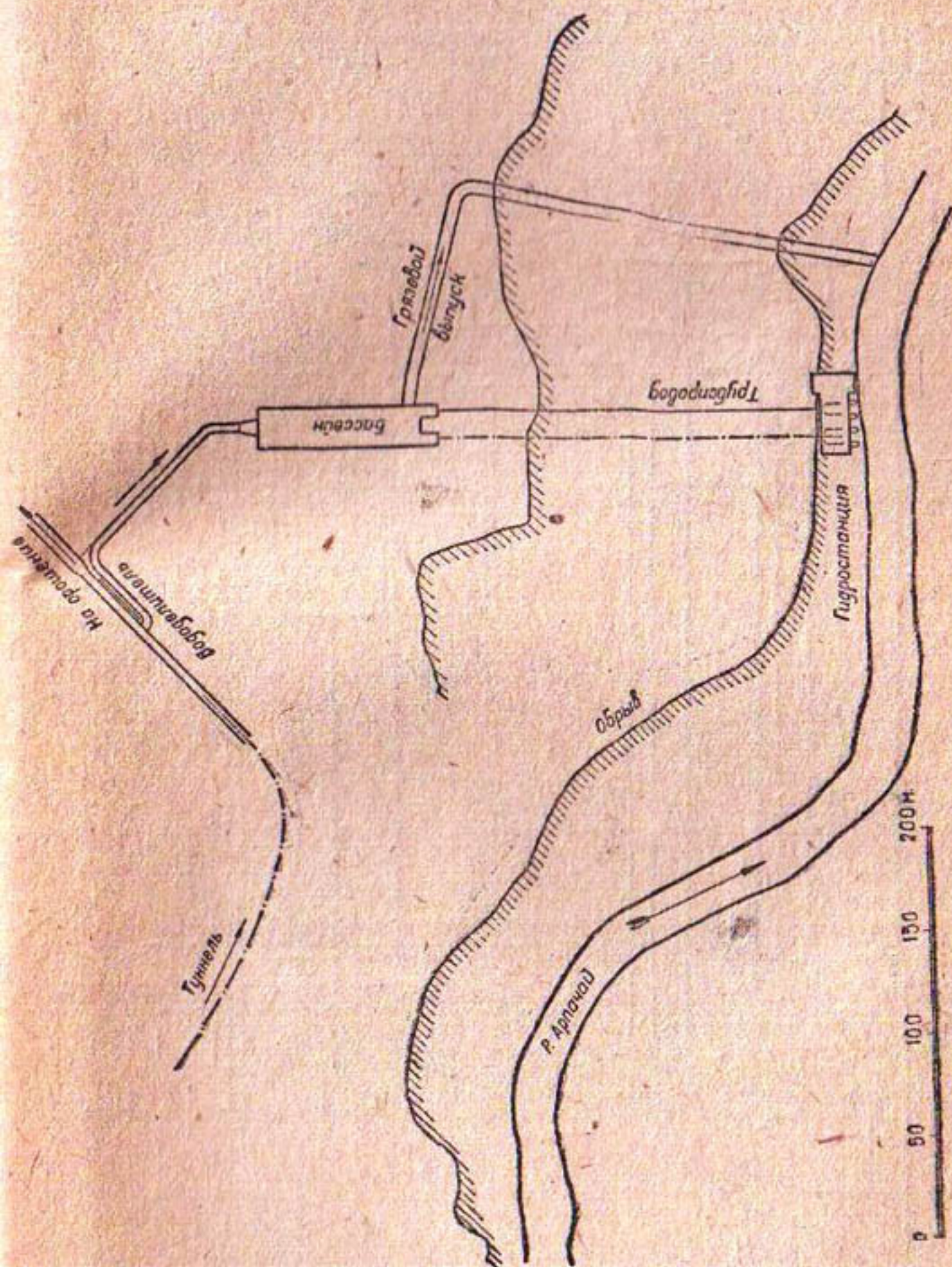


Рис. 6. План сооружений.

ветвления — 216 м. Он исполнен заводом „Красный путиловец“ в Ленинграде по чертежам Государственного электротехнического треста. Трубопровод уложен в выемку грунта и скалы, частью засыпан, частью (в крутых местах) забетонен (рис. 10). Во время производства работ

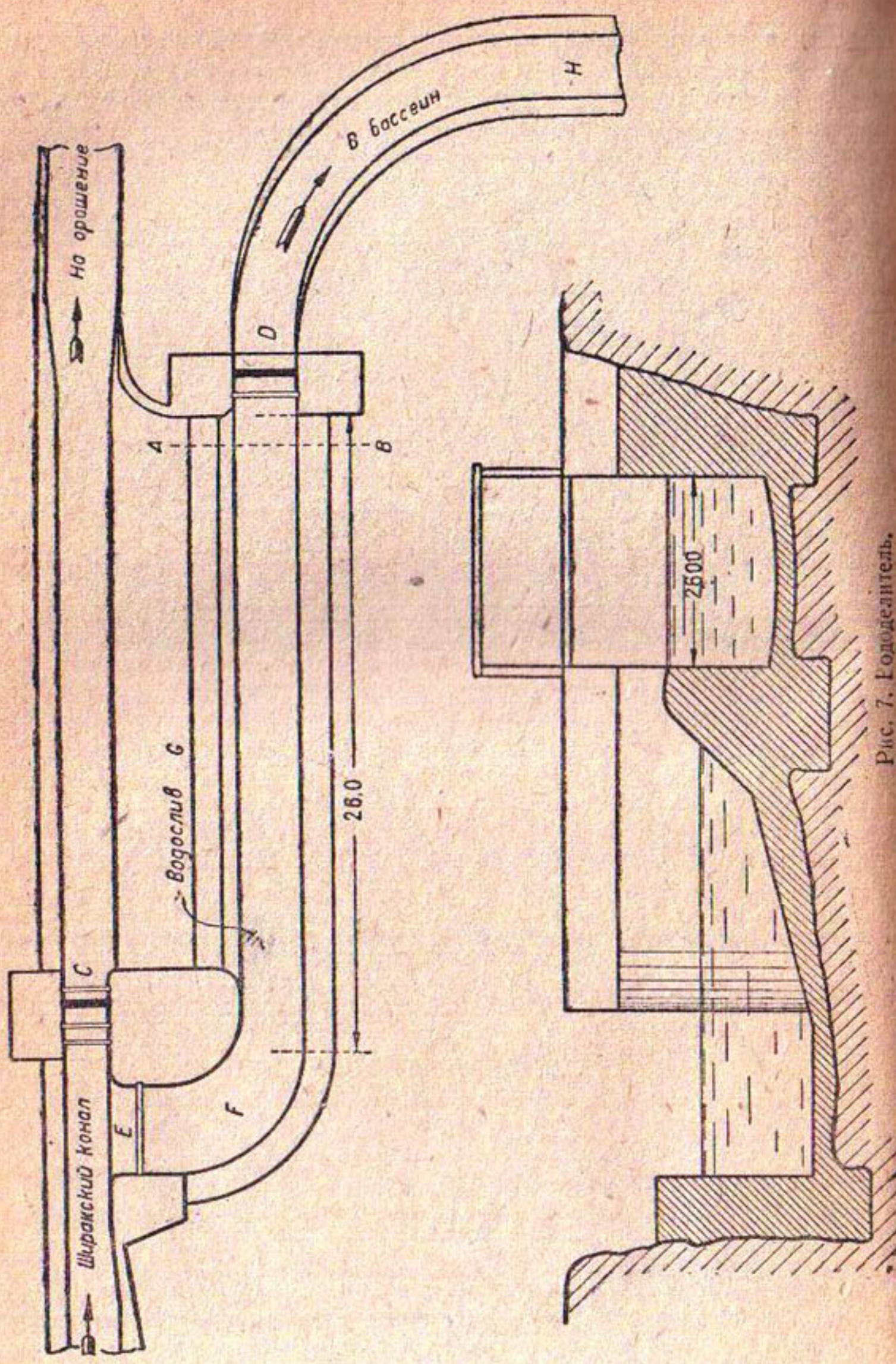


Рис. 7. Гододельитель.

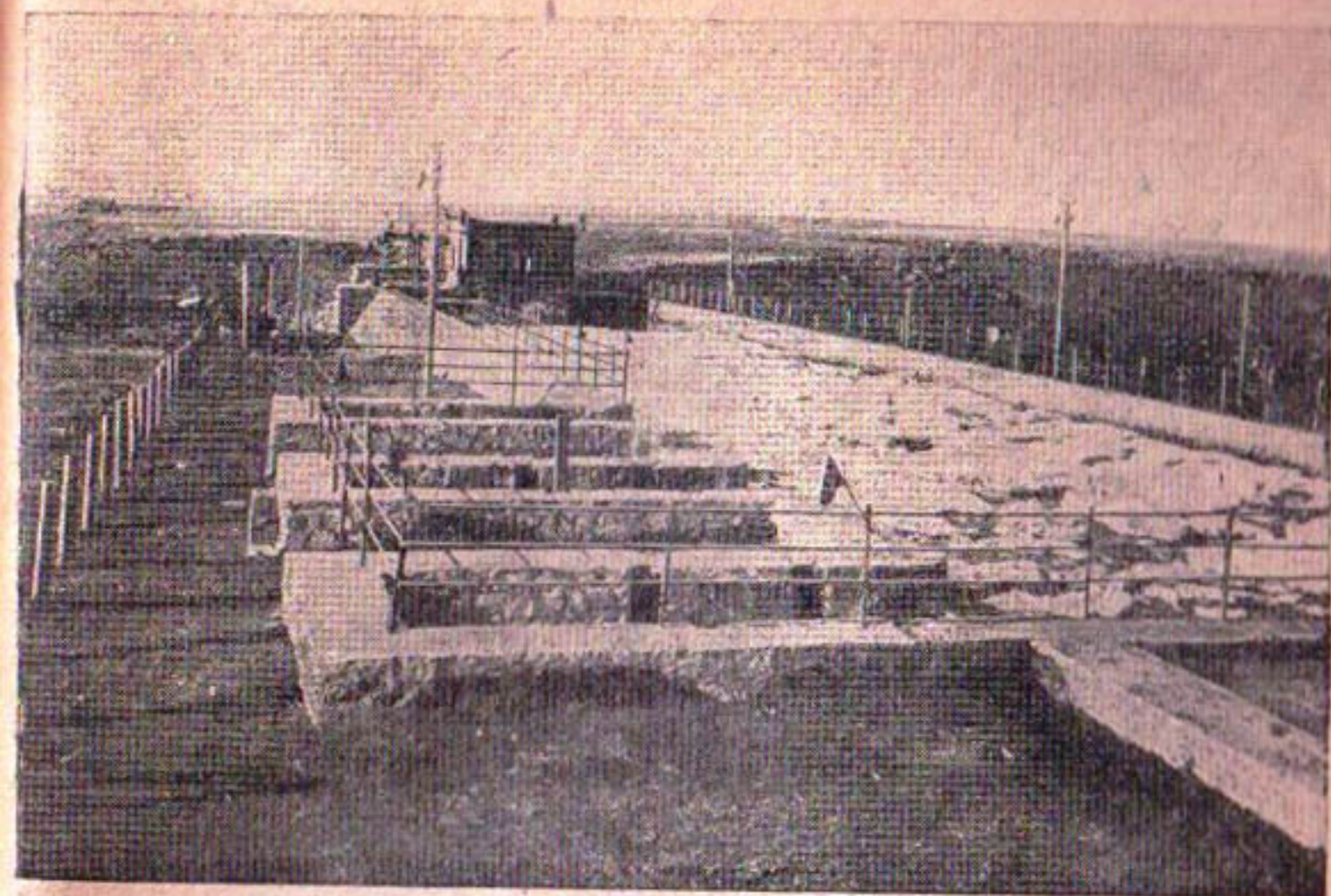


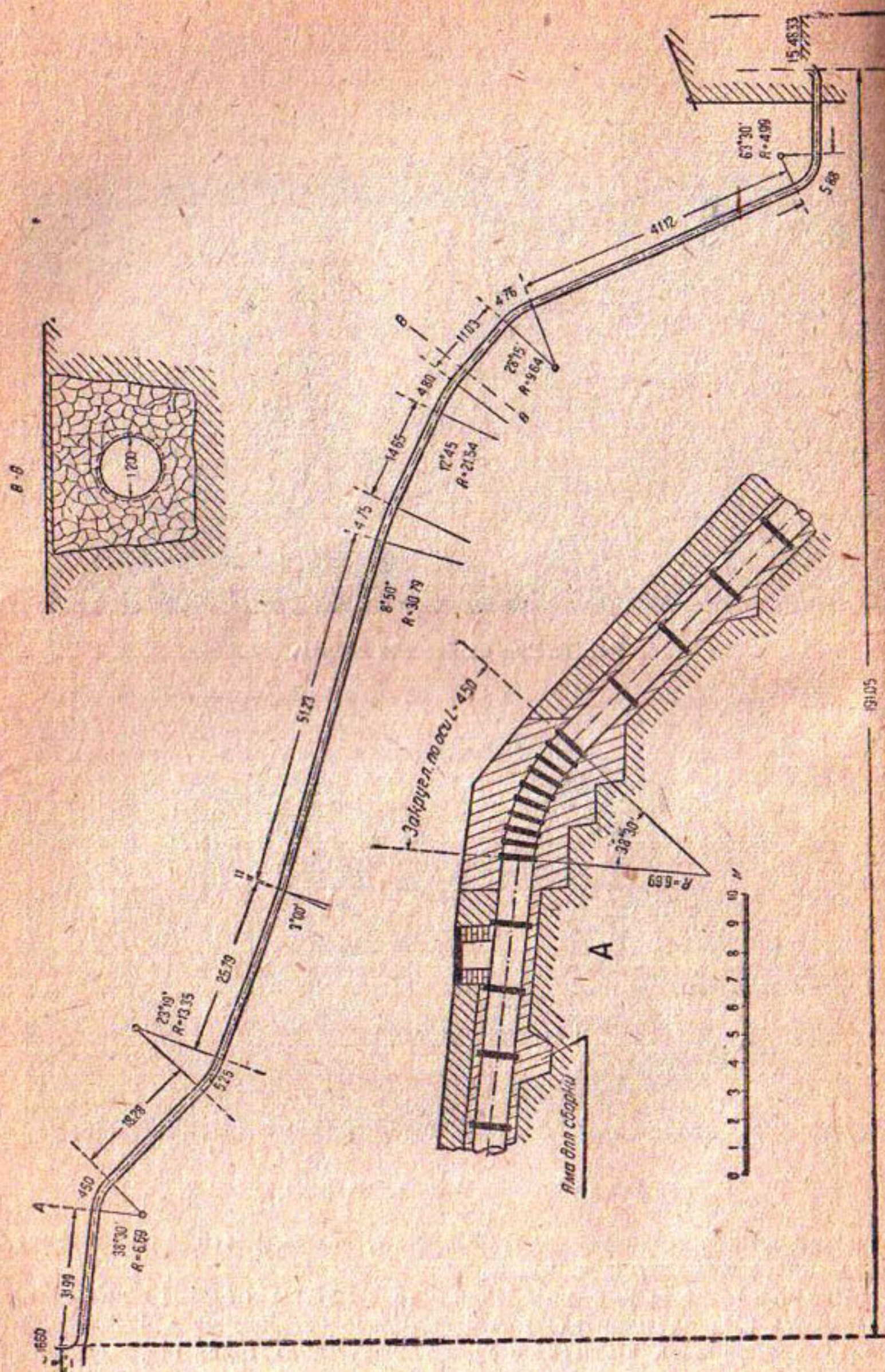
Рис. 8. Вид на бассейн сверху.



Рис. 9. Вид на бассейн и напорные камеры снизу.

решили, прежде чем засыпать трубопровод, покрыть его во избежание ржавления слоем бетона в 0,2 м.

При предположенных колебаниях температуры от $+15$ до -5°C получается (без расширителей) температурное напряжение в 400 кг/см^2 . Внизу трубопровод разветвляется на 2 турбины (рис. 11), уменьшая



свой диаметр постепенно до 600 мм. Имеется для точной установки переменное по длине звено со сгонной муфтой. Все разветвление — стальные отливки; их толщина предполагалась в 25 мм, но во избежание брака толщина увеличена до 35 мм.

По смете предполагались: металлические части трубопровода 124 000 кг на сумму 236 700 руб. (литое железо по 86,28 коп., стальное литье по 173,4 коп. за 1 кг) и строительные работы на 80 300 руб.; итого

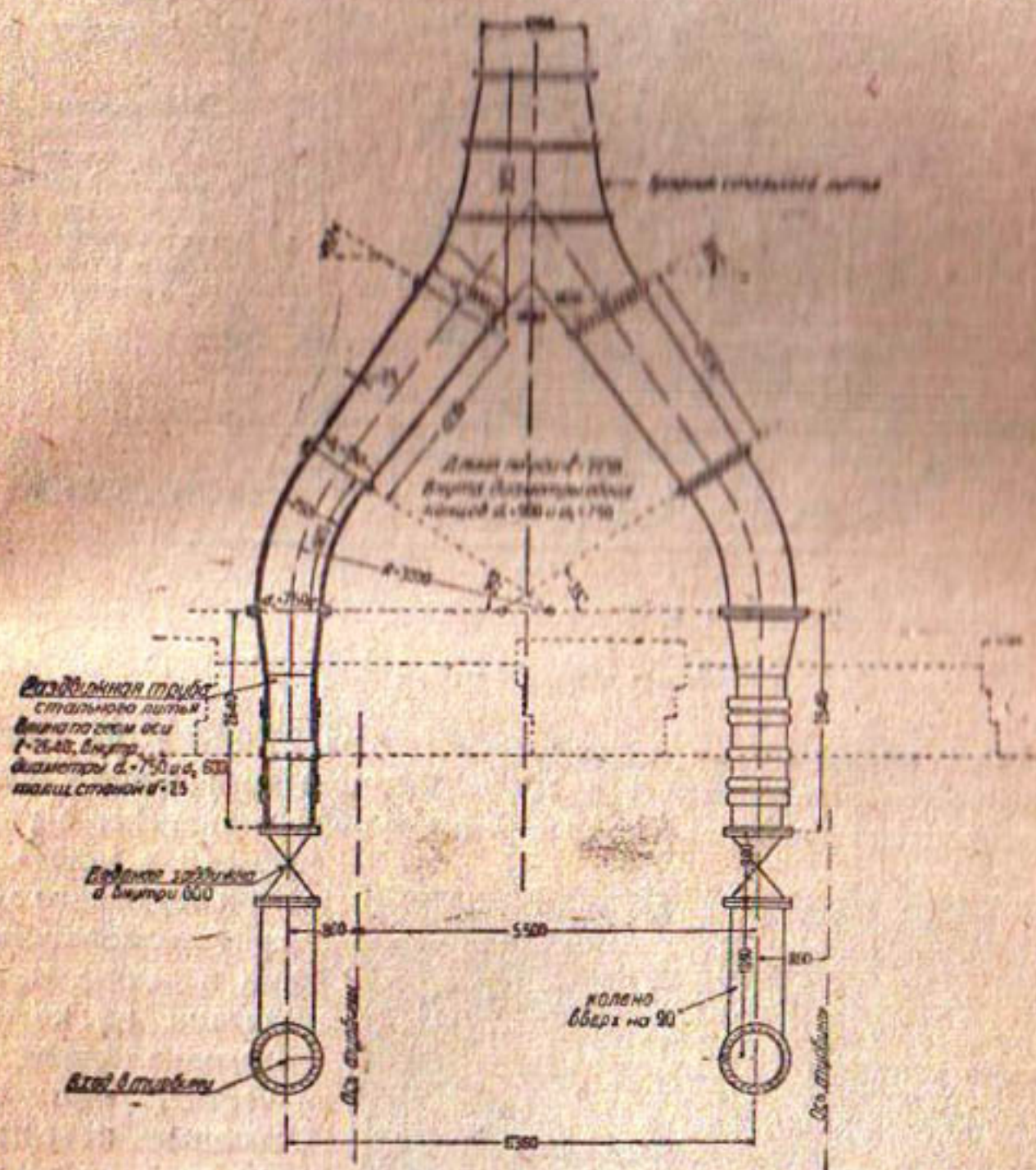


Рис. 11. Разветвление трубопровода в плане.

317 000 руб. Из-за окружения труб бетоном, увеличения анкерных опор и утолщения отливок трубопровод обошелся в 378 700 руб. (110 900 кг металла на 272 400 руб. и строительные работы на 106 300 руб.).

Железобетонное здание гидростанции имеет гнезда на 5 турбин. На первом трубопроводе пока установлены две однопоточные горизонтальные спиральные турбины по 1500 л. с. при 750 оборотах, при рабочем напоре (по данным завода) 114 м и высоте всасывания 4,3 м, с удельным числом оборотов 78. Изготовлены они Ленинградским машино-

строительным трестом (заводские №№ 18 и 19, 1926). При них установлены германские регуляторы Неймейра. На валах — генераторы б. Электротехнического треста центрального района на 6600 V при

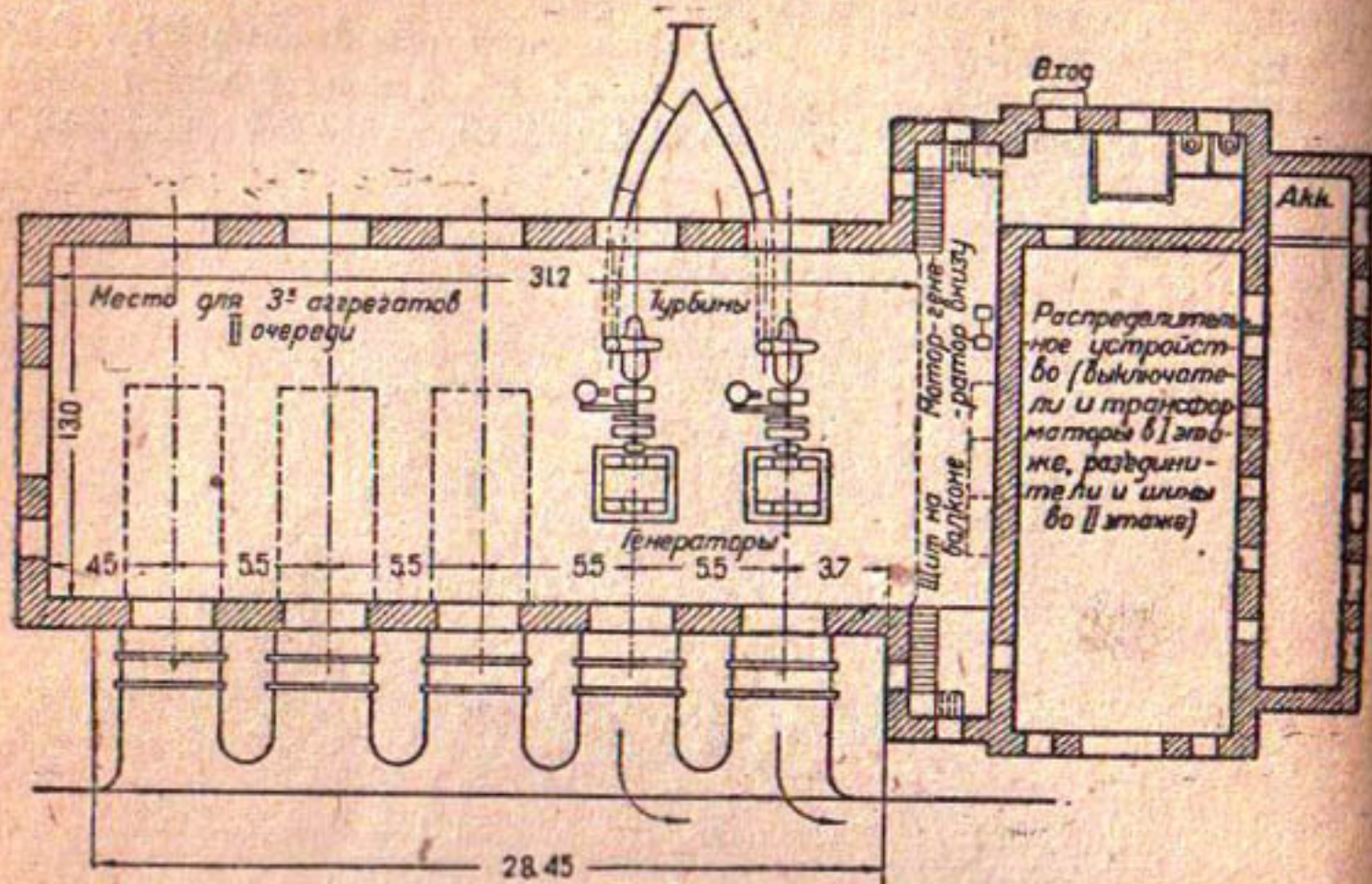


Рис. 12. План машинного здания.

дальнейшем повышении в трансформаторах на 22 000 V, на 1300 kVA, при коэффициенте мощности 1 и 1040 kVA, при коэффициенте мощности 0,8, возбудители на концах валов. Валы турбин разрезные, с упругими

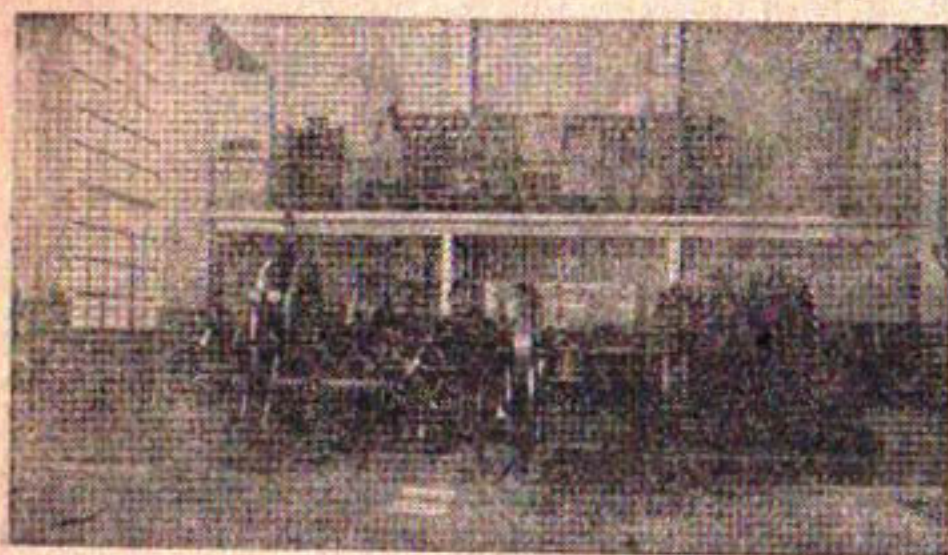


Рис. 13. Машинный зал.

муфтами в виде внутреннего и наружного ободьев, с противолежащими выемками и закладными в них пакетами из кожи; всасывающие трубы металлические, вертикальные. Отводные камеры отделены друг от друга бычками и выпускают воду непосредственно в Арпачай (рис. 3, 12, 13 и 14).

Гидростанция была начата постройкой в 1926 г. и пущена в начале де-

кабря 1928 г. Стоимость I очереди по смете 1515 000 руб. без сети, со II очередью (на 7 500 л. с. при 2 бассейнах, 2 трубопроводах и 5 турбинах) около 2 000 000 руб., т. е. 267 руб. на установленную силу; при этом 50% стоимости верхней части Ширакского канала относится

на счет гидростанции. Себестоимость энергии (при отчислениях 9% на восстановление капитала) понижается по мере развития потребления с 2 до 1,1 коп. на шинах станции.

Станция принадлежит электрохимическому тресту Армении. Она работает на освещение Ленинакана и, главным образом, на вновь выстроенную в нем текстильную фабрику. Нагрузка в течение суток очень равномерная, например 4 июня 1929 г. колебалась от 420 до 690 kW, составив в среднем 532 kW, правда, при очень низком коэффициенте мощности: от 0,48 до 0,71. В очередь будет загружена, главным образом, другой строящейся половиной той же фабрики.

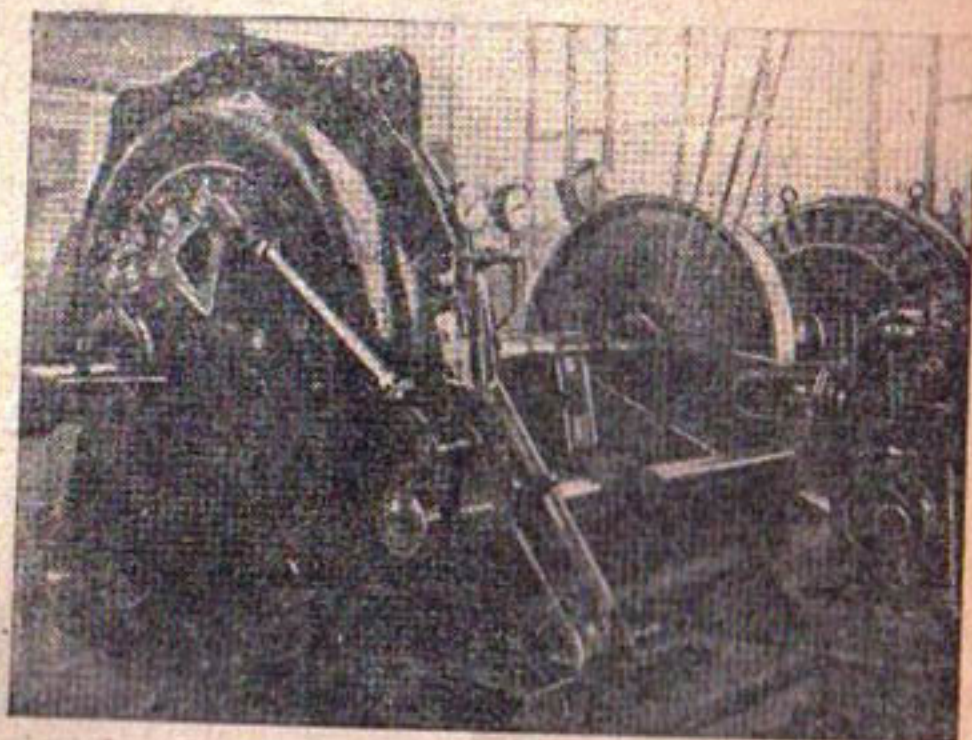


Рис. 14. Турбина.

Турбины должны были быть доставлены трестом ЭТЦР мощностью по 1500 л. с. для напора 110 м при числе оборотов 750. При этом гарантированы также к. п. д. (с колебаниями на 1% в ту или другую сторону):

при нагрузке	1/1	3/4	1/2
к. п. д.	80%	82%	78%

Максимальное колебание числа оборотов турбины при внезапном изменении нагрузки на 100, 50 и 25% не должно превосходить 18, 7, 3,5% с отклонением на 1% в ту или другую сторону. Стоимость одной турбины с муфтой и маховиком франко-завод без упаковки 31 000 руб.

Для к. п. д. генераторов (по 31 200 руб.) в договоре указаны такие данные:

Мощность (л. с.)	1500	1075	750
К. п. д.			
при $\cos \varphi = 1$	95%	93%	92%
при $\cos \varphi = 0,8$	94%	92,5%	90,5%

3. ИСПЫТАНИЯ 1928 г.

Приемка гидростанции была произведена особой комиссией в ноябре—декабре 1928 г. При этом турбины тормозились на водяной реостат, описанный ниже. При продолжительном торможении агрегата I (турбина № 18) в течение 6 час. на 1150 kW при окружающей температуре

16—17° температура упорного подшипника поднялась за $2\frac{1}{2}$ час. до 55° и осталась такой до конца; температура остальных двух подшипников не превышала 51,5°. У агрегата II (№ 19) при 10-часовой нагрузке и окружающей температуре до 18° температура упорного подшипника не превышала 52°, а других — 54,5°.

Испытание регуляторов 6—7 декабря дало результаты согласно таблицы 1.

Испытание регуляторов 1928 г.

Таблица 1

№ опыта	1	2	3	4	5
Изменение	Разгрузка			Нагрузка	
Доля от 1500 л. с. (‰)	25	50	100	25	50
Агрегат I					
Временная неравномерность (‰)	6,68	10,10	12,85	5,42	10,70
Остающаяся неравномерность (‰)	1,20	1,73	1,73	0	2,30
Время полного успокоения (сек.)	17,20	15,30	19,80	12,50	18,30
Агрегат II					
Временная неравномерность (‰)	4,51	9,94	12,30	4,27	8,10
Остающаяся неравномерность (‰)	0,93	1,30	2,00	1,88	3,40
Время полного успокоения (сек.)	13,70	15,30	22,00	10,50	8,50

Работа производилась на водяной реостат. Из сравнения таблицы с гарантией видно, что только в двух из десяти случаев гарантия максимального колебания выдержана, именно при 100‰-ной разгрузке (столбец 3, строки 4 и 7); в остальных восьми колебания превышали гарантированные на 0,8 — 3,7‰.

Опыты параллельной нагрузки показали следующее. При работе на реостат оба агрегата, включенные параллельно, имели сперва нагрузки по 200 kW, по увеличении ее она оказалась: на агрегате I—1010 и на II—1040 kW; по снижении ее вновь она оказалась: на I—350 (открытие 0,22) и на II—500 kW (открытие 0,38). Затем агрегат I был нагружен текстильной фабрикой на 235—245 kW; при этом оказались длительные колебания числа периодов (между 48 и 49,5 сек.), что сильно задержало параллельное включение II агрегата.

Представители Машинотреста дали объяснения: 1) превышение договорных цифр динамического изменения числа оборотов при изменении нагрузки на 25 и 50‰ сделано умышленно путем соответствующей установки регулятора для улучшения условий параллельной работы при больших нагрузках; 2) неравномерное автоматическое распределение нагрузки между агрегатами не имеет вредного значения, перераспределение нагрузки легко производится со щита электрической перестановкой регулятора; 3) колебания частоты всегда имеют место и не имеют вредного влияния.

При полной нагрузке комиссия наблюдала во всасывающих трубах шум и сильные глухие удары, особенно слышимые в отводной камере. При сильных ударах у турбины № 19 замечалось в камере образование вихревых течений с резкими повышениями горизонта и пеной.

Что касается к. п. д. турбин, то определить его достаточно точно в декабре 1928 г. не удалось. Причиной неудачи было неточное измерение расхода, так как в это время река заносит в канал, тоннель и бассейн большое количество шуги (донного льда)¹⁾. Поэтому измерение расхода в канале вертушкой оказалось невозможным, и пришлось работать ею при выходе из отводной камеры турбины при переменных и неравномерных скоростях.

Производивший замеры гидрометр предупреждал комиссию о невозможности здесь удовлетворительного замера расхода. Действительно, результаты 10 измерений 2—7 декабря оказались мало согласованными между собой и с несообразно большими к. п. д. турбин (до 92%, табл. 2). В конце испытаний была сделана попытка определить расход опорожнением напорного бассейна при запертом приводном канале (опыт № 11, табл. 2). Попытка дала к. п. д. значительно меньший, нежели по определениям расхода вертушкой при той же нагрузке (опыты № 9 и 10).

Ввиду таких результатов комиссия приняла всю гидростанцию кроме турбин, отложив их повторное испытание по настоянию представителей Главэлектро до весны 1929 г., когда шуга не будет мешать измерению расхода.

4. ИСПЫТАНИЯ 1929 г. И ЗАМЕРЫ РАСХОДА.

В июне 1929 г. перед новой комиссией по приемке турбин встал задача возможно точнее измерить расход. Методика измерений была предложена комиссии сотрудниками Института, которая и была одобрена комиссией.

Для измерения расхода было избрано сечение АВ в начале канала (рис. 7) у вододелителя; здесь сечение канала почти прямоугольное (небольшая вогнутость дна); струи достаточно выравнивались после заворота F (на расстоянии около 20 м). Канал H был забракован как трапециевидный, в нем определение сечения более затруднительно и менее правильно распределение скоростей. Сечение напорной камеры перед выходом в трубопровод мало доступно, и вода имеет ничтожные скорости.

Измерение расхода объемным путем (спуском воды из бассейна), вероятно, тоже привело бы к надежным результатам. Однако на повторение опытов этим способом не было времени; бассейн, как сказано, имеет площадь $18 \times 85,5 \text{ м}^2$ и может сбрасываться нормально на глубину 2 м; соответствующего объема воды (3080 м^3) хватило бы на работу одной турбины при номинальной мощности и расходе около $1,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ не более как на 40 мин.

¹⁾ См. К. Н. Загородный — Борьба с шугой на Ленинканской гидроэлектростанции в 1928/29 г., Труды I Всесоюзного съезда Гидронито, 1934, стр. 59.

Таблица 2

Испытание турбин 2, 4, 5, 6, 7 декабря 1928 г.

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	I/19						II/28				
№ агрегата											
Открытие по указателю (%)	40	52	60	66	68	71	36	49	—	63	—
Напор полный H_1 (м)	115,28	115,60	115,43	115,10	115,38	115,40	115,80	116,24	116,10	116,22	—
Давление $\frac{P}{\phi}$ (м)	105,0	104,3	102,6	102,3	102,5	104,4	104,0	104,0	102,4	102,0	—
Высота всасывания (м)	4,17	4,14	4,11	4,11	4,10	4,10	4,10	4,05	4,01	4,00	—
Разрежение во всасывающей трубе (м)	4,1	5,0	6,1	6,3	6,3	6,5	3,5	3,7	—	6,8	—
Скоростной напор (м)	—	—	—	—	—	—	0,64	1,25	2,00	2,21	—
Рабочий напор H (м)	109,17	109,46	108,63	108,43	108,43	108,78	108,71	109,30	108,41	108,21	—
Расход Q (м ³ /сек)	0,62	0,88	1,14	1,20	1,18	1,34	0,68	0,97	1,23	1,29	—
Число оборотов n	749	750	750	750	750	752	750	750	750	750	—
Мощность генераторов N_1 (kW)	511,9	763,4	1 051,6	1 062,0	1 049,0	1 154,0	504,8	778,3	1 041,0	1 050,0	—
Коэффициент мощности $\cos \varphi$ (%)	96,7	97,4	99,0	98,0	99,0	99,0	—	—	99,0	—	—
К. п. д. генератора η_1 (%)	90,8	93,0	94,1	94,1	94,0	94,5	90,1	93,0	94,2	94,2	—
Мощность турбины N л. с.	764	1 115	1 519	1 475	510	1 660	760	1 139	1 505	1 515	1 505
К. п. д. турбины η	84,3	86,9	92,1	83,4	88,4	85,4	77,5	80,5	84,6	81,4	79,0

Для измерения расхода сотрудники Института располагали двумя вертушками завода Отта типа IV на овальных штангах и трехперым хронографом Отта же. Для первой вертушки (№ 3094) имелась тарировка Отта, и вертушка эта после получения с завода не употреблялась. Вторая (№ 3132) была тарирована в СССР. В виде предварительной работы был замерен расход в намеченном месте при определенной нагрузке в 18 точках сечения, причем одновременно работали обе вертушки и в каждой точке за время измерения побывали (последовательно) обе вертушки. Первая вертушка дала расход 0,651, вторая — 0,684 м³/сек, т. е. на 5% больше. Затем замер в одной точке дал аналогичные результаты: первая вертушка дала скорость 0,237, а вторая 0,252 м/сек, т. е. на 6,1% более. Эксперт Армводхоза доставил третью вертушку, также Отта (№ 4457) типа V (с контактом в камере с маслом), с тарировкой Отта же. Все три вертушки для проверки ставились в одну и ту же точку последовательно, что было повторено два раза. Сравнение результатов показало довольно близкое совпадение показаний вертушек первой (скорости 0,538 и 0,598 м/сек) и третьей (0,535 и 0,604) и значительные и неравномерные отклонения показаний (0,546 и 0,546) второй от двух остальных. Напрашивалось заключение, что вторая вертушка (№ 3132) имеет какие-то дефекты в тарировке или в механизме, поэтому она в дальнейшем не употреблялась.

Для создания постоянной нагрузки в декабре был устроен водяной реостат (рис. 15) в виде подвесной деревянной рамы А с подвешенными к ней тремя железными электродами в виде трапеций В. Рама спускалась в устье К отводной из-под турбин камеры между бычками F; электроды омывались водой, тормозившей турбины. Канат С через блок D и окно введен в машинный зал G и укреплен на воротах E. Во избежание колебаний на раме укреплены проушины, а на бычках два шеста H, служащие для рамы направляющими. Реостат работал вполне исправно; погружение электродов в воду при напряжении 6600 В и мощности до 1100 kW доходило до 150—200 мм. Нагрузка держалась без колебаний, но устанавливать ее точно на заданную величину было затруднительно. Равенство трех фазовых сопротивлений было проверено постоянным током.

Комиссия приняла следующие положения для испытаний:

1. Турбины испытываются при мощностях, по возможности близких к указанным в договоре, т. е. 100, 75 и 50% от 1500 л. с.
2. Турбины нагружаются описанным выше реостатом.
3. Испытуемая турбина работает на автоматическом регуляторе, поддерживающем 750 оборотов.
4. За отметки отдельных точек принимаются нивелирные отметки, имеющиеся на исполнительных чертежах.
5. Давление измеряется точным манометром, доставленным Институтом.
6. Измерение расхода производится вертушками: первой (Института) и третьей (Армводхоза).
7. Расход измеряется в указанном выше сечении АВ прямоугольного канала в 15 точках на 5 вертикалях, срок наблюдения в точке не менее 1 мин., число оборотов вертушки не менее 100. Утечка из бассейна через

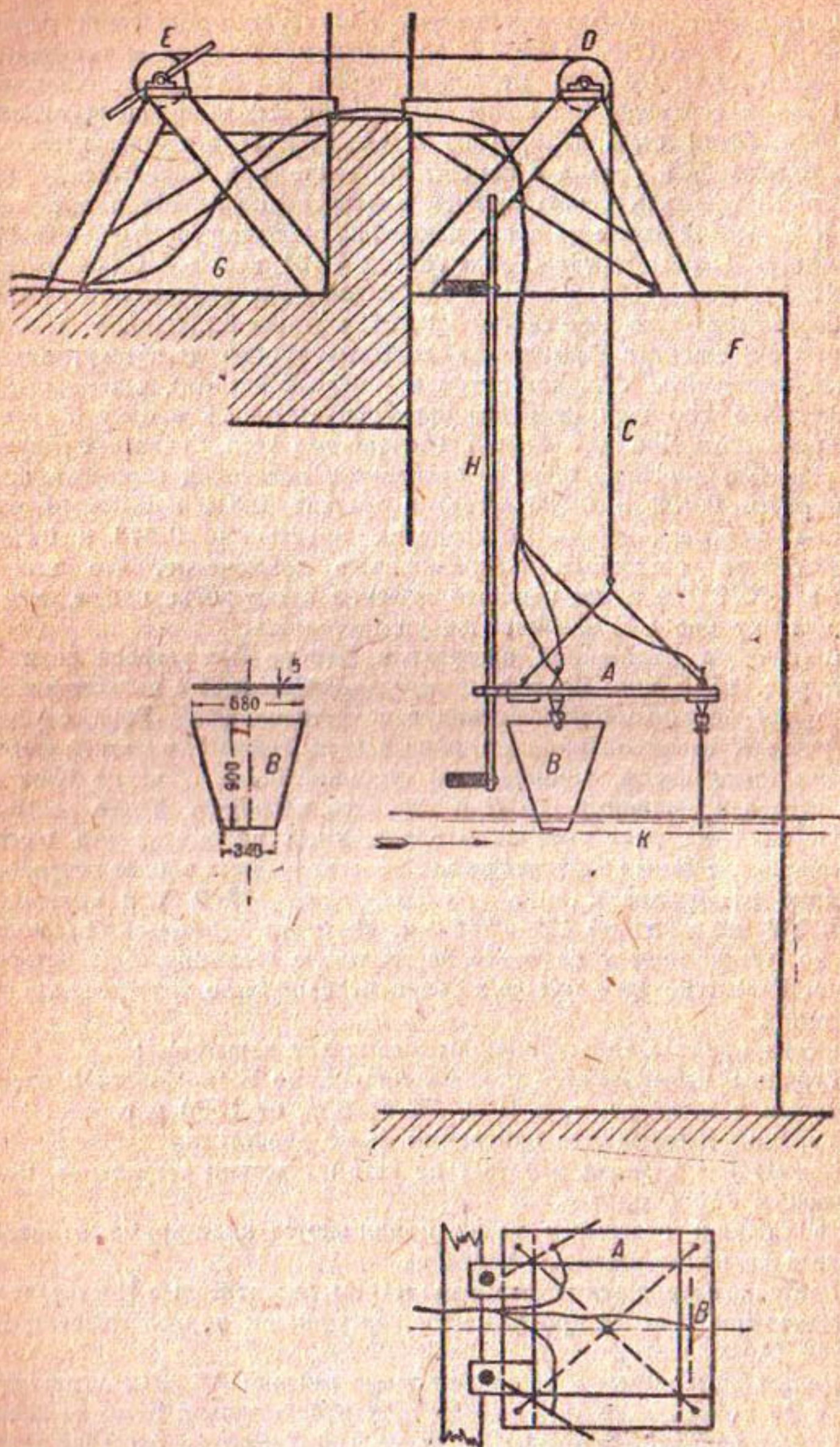


Рис. 15. Водяной реостат.

неплотный грязеспуск и влияние скопления воды в бассейне за время опыта учитываются особо.

8. Электрические данные измеряются точными приборами (амперметром, вольтметром, ваттметром, трансформаторами тока и напряжения и сопротивлением), доставленными из ВСНХ Армении; замер по этим приборам, тахометру и манометру производится каждые 10 мин.

9. За к. п. д. генераторов принимаются коэффициенты, полученные при заводском их испытании.

10. Испытываются последовательно обе турбины, первой испытывается № 1/18.

11. Перед испытанием турбин вскрываются лазы их всасывающих труб и осматриваются их колеса.

Наибольшие разногласия в комиссии вызвал пункт 1. Представители заказчика настаивали на всестороннем испытании турбины в пределах возможного их открытия, хотя бы при полном открытии мощность оказалась и значительно больше указанных в договоре 1500 л. с. При этом они ссылались на испытание Волховской гидростанции (Известия Электротока, № 2, 1929, стр. 16), где комиссия поставила „основной целью испытаний получение всей кривой изменения к. п. д. в функции от ее полезной мощности при нормальном напоре“. Дополнительным доводом за такое испытание является физическая возможность, с одной стороны, открыть турбину полностью и, с другой, для генератора взять на себя длительно (при $\cos \varphi = 1$) 1300 kW, т. е. снять с турбины около 1860 л. с. Представители же ГЭТ (и Машиностроя как первоначального поставщика) предлагали испытать турбину до мощности в 110% от договоренной (т. е. до 1650 л. с.) и затем сравнить гарантированные к. п. д. с полученными при 100, 75 и 50% от этой мощности. При этом они ссылались на соответствующий § 18 германских правил приемочных испытаний (изд. 1926) и § 142 проекта союзных правил М. В. Малышева (Техника и производство, № 3, 1927, стр. 14). Против нагрузок турбины свыше 1650 л. с. представитель Машиностроя категорически протестовал, указывая, что задачей приемных испытаний является только проверка работы оборудования с условиями заказа.

Комиссия ввиду этих разногласий решила придерживаться буквально текста договора. Пункт 10 не был выполнен; удалось испытать лишь первую турбину, результаты испытаний были признаны настолько ясными, что обе стороны не настаивали на испытании второй турбины, которое было бы связано с остановкой на день текстильной фабрики.

В начале испытания задержались вследствие трудности получить установившийся режим в верхнем бьефе. При открытии щита С (рис. 7, щит D был открыт полностью) горизонт в мерном сечении АВ колебался, колебался расход и изменялся горизонт в бассейне. Очевидно, голова канала забирала переменный расход. Удалось наладить постоянный режим лишь постоянным регулированием щита С при команде с места А так, чтобы в АВ держался один горизонт. Этим достигалось почти постоянное положение горизонта в бассейне (в первом из трех опытов размах его колебаний был 37 мм, в последнем при вдвое большем расходе всего 20 мм), т. е. постоянный расход.

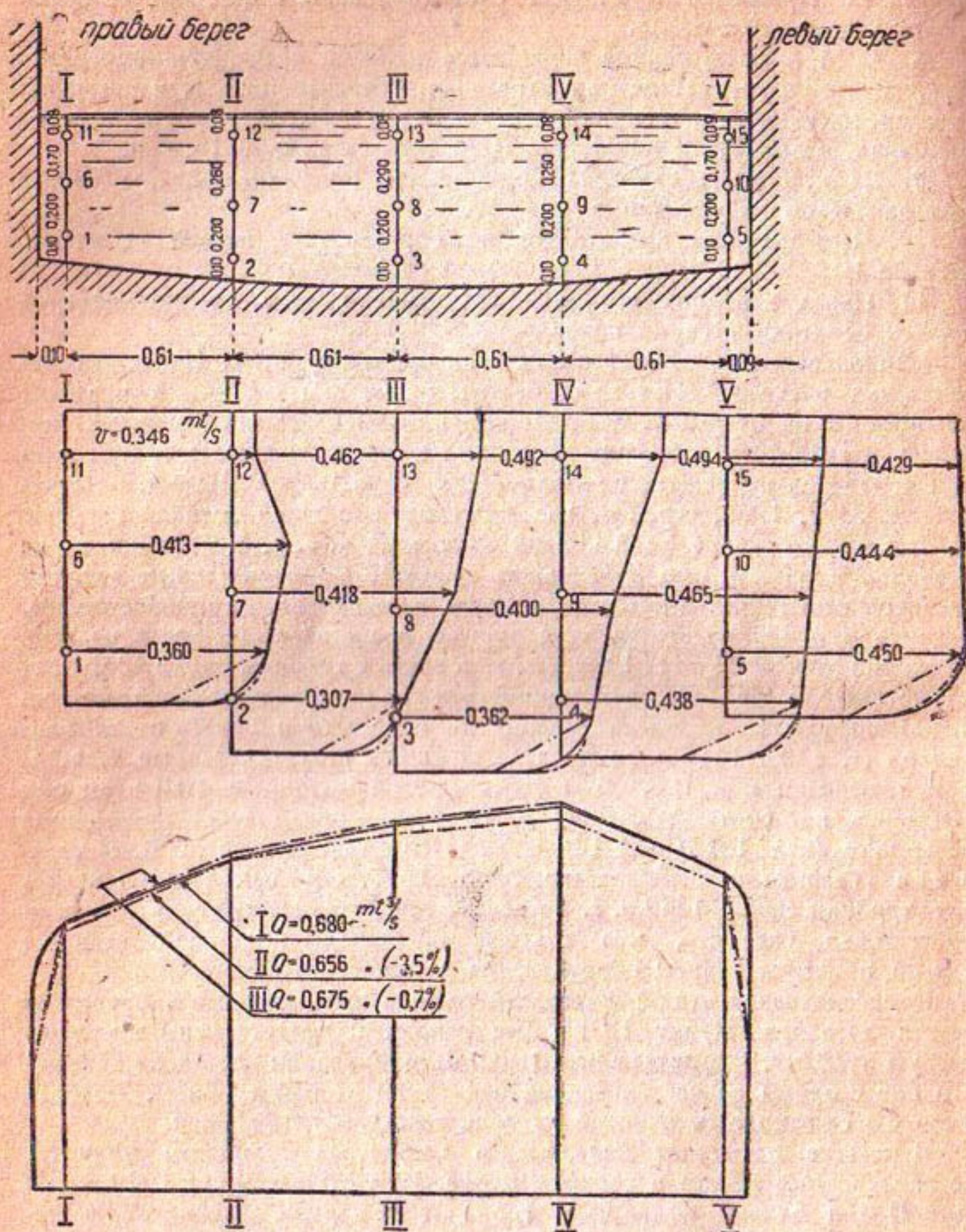


Рис. 16. Измерение и вычисление расхода при опыте 1.

Как сказано, число точек n в сечении для измерения расхода принято в 15. По швейцарским нормам (1924 г.) для выбора числа точек указываются (§ С 3) два соотношения. Первое неравенство:

$$14 \sqrt{F} < n < 25 \sqrt{F}.$$

При испытаниях площадь сечения F была около $2,6 \text{ м}^2$, и $22 < n < 40$. Второе неравенство:

$$0,02 \frac{F}{\pi r^2} < n < 0,10 \frac{F}{\pi r^2},$$

где r — радиус колеса вертушки; в испытании $r = 60 \text{ мм}$, и тогда $5 < n < 23$. Принятое число (15) точек удовлетворяет второму неравенству.

Из 15 точек сечения (рис. 16) все крайние (12) придвигались во всех трех опытах возможно ближе к стенкам и поверхности сечения — на 8–10 см.

I опыт был проведен одновременной работой на двух вертушках так, чтобы обе вертушки пребывали в каждой точке; порядок установки первой вертушки (№ 3094, рис. 16) был: точки 4, 5, 1, 2, 3, 9, 10, 6, 7, 8, 11, 15, 14, 12, (пропуск), 13, а третья (№ 4457) одновременно ставилась в точки: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 11, 12, 14, 13, (пропуск). Два наблюдателя с секундомерами записывали показания вертушек по слуху (одна на звонок, другая на зуммер); обе вертушки параллельно были приключены к хронографу, у которого был третий наблюдатель; четвертый следил за горизонтом в мерном сечении и отдавал команду рабочему у щита; наконец пятый замерял горизонт в бассейне; еще два рабочих держали штанги вертушек, всегда упиравшиеся в дно. Итого наверху было пять наблюдателей и трое рабочих.

Таким образом для опыта I получились независимые данные от двух вертушек, по коим можно было взаимно проверить два замера одного и того же расхода. Расходы, подсчитанные по одинаковому методу для обеих вертушек, оказались совпадающими (разница $0,03\%$), что еще раз косвенно подтвердило исправность вертушек.

В каждом из опытов II и III в каждой точке побывало лишь по одной из этих двух вертушек, что значительно ускоряло время опыта.

Запись числа оборотов по слуху производилась у каждой вертушки тремя секундомерами; в конце первого звонка пускались первый и второй, в конце второго останавливался второй и пускался третий; записывалось показание второго, и он переводился на ноль; после конца третьего останавливался третий и пускался второй; записывалось показание третьего, и он переводился на ноль, и так далее; при конце последнего звонка останавливались два секундомера: первый и один из двух других. Таким образом первый показывал время всех звонков вместе, а оба других — промежутки отдельных звонков. Среднее время оборота вычислялось по первому секундомеру, а отдельные промежутки служили контролем исправности вертушек и отсутствия чрезмерной пульсации.

5. ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСХОДОВ.

В результате замеров скоростей вертушками были получены графические записи промежутков между звонками по хронографу и записи между ними по секундомерам.

Обработка была начата вычислением этих промежутков по ленте хронографа и секундомерам; если данные получались близкими, то бралось арифметическое среднее; если разногласие получалось большее, то сравнивалась достоверность обеих записей и выбиралось более надежное (обычно по хронографу). Число звонков в точке было от 4 до 9, число оборотов вертушки от 100 до 200, срок замера от 50 до 200 сек. Затем по тарифовочным кривым каждой из вертушек вычислялись скорости v в точках.

Далее вычислялись площади $\int v dz$ для каждой вертикали (рис. 16, середина); по ширине канала x строилась кривая этих площадей (тоже низ), и вычислялась площадь этой кривой $\int dx \int v dz$, которая и давала расход Q .

Однако в обоих этих построениях возможны разные способы проведения кривых; в частности, наибольший произвол представляет проведение обеих кривых около примыкания их к стенкам.

По способу, применяемому в Закавказье при гидрологических исследованиях (обозначение III на чертеже), вершина предпоследней ординаты кривой соединяется прямой линией с вершиной последней ординаты, которая принимается равной половине предпоследней. Вычисление площади производится вычислениями площадей трапеций, при этом расход несомненно преуменьшается.

Швейцарские нормы (пункт С 4) рекомендуют крайние участки кривых проводить по дугам круга, касательным к предпоследним участкам кривых и последним ординатам (обозначение I на чертеже). Такое построение, вероятно, с удовлетворительной точностью учитывает изменение скорости и дает расход. Однако и здесь имеется произвол: при разном соотношении масштабов для скоростей и расстояний и значения расходов получатся несколько различными. Способ требует применения циркуля и планиметра.

Так как на испытании неудобно было работать с циркулем и планиметром, то был применен промежуточный способ (II), основанный на том, что кривые скоростей до предпоследнего участка падают не круто. У кривых скоростей упомянутые дуги кругов предполагались в виде четвертей окружностей с осями на предпоследних ординатах. Это несколько преувеличивало расход. На кривой же расхода последние участки проводились по закавказскому способу, что преуменьшало расход. Все вычисления могли быть произведены арифметически как определения площадей простых фигур.

Для сравнения двух параллельных замеров двумя вертушками был произведен независимый подсчет расхода по обоим комплектам замеров — по закавказскому способу. Получилось полное совпадение расхода (0,6557 и 0,6659 м³/сек), подтверждающее точность вертушек.

Дальше надо было учесть влияние заполнения или опустения бассейна. Наблюдения за его горизонтом производились под навесом в его нижнем конце по миллиметровой рейке. Точность отсчетов — примерно ± 2 мм. Колебание горизонта по указанной выше причине было соответственно в пределах 37, 78 и 20 мм. Повышение или понижение за время

опыта, помноженное на площадь (по чертежу), давало изменение объема; последнее, деленное на срок опыта, давало поправку к расходу. Наконец последнюю поправку составляла скидка на утечку чрез не вполне плотный грязеспуск из бассейна, оцененная глазомерно в 1 л/сек.

Тогда определение расходов получается согласно таблицы 3.

Таблица 3

Определение расходов 1929 г.

№ опыта	I	II	III
Расход в канале Q_1 (м ³ /сек)	0,675	0,962	1,279
Изменение горизонта бассейна Δh (м)	— 0,005	— 0,015	— 0,002
Изменение его объема $\Delta V = \Delta h \cdot 1540$ (м ³)	7,70	23,10	3,08
Срок опыта t мин.	105	63	38
Поправка расхода бассейн $Q_2 = \frac{\Delta V}{t \cdot 60}$ (м ³ /сек)	+ 0,001	+ 0,006	+ 0,001
Поправка расхода на грязеспуск Q_3 (м ³ /сек)	— 0,001	— 0,001	— 0,001
Расход турбины $Q_1 + Q_2 + Q_3$ (м ³ /сек)	0,675	0,967	1,279

После окончания работ комиссии, в Москве в гидротехническом секторе Института для опыта I была повторно произведена обработка расходов по всем трем названным методам для их сравнения. Расход оказался равным (рис. 16):

По швейцарскому способу	0,680 м ³ /сек
„ закавказскому „	0,656 „
„ примененному „	0,675 „

т. е. закавказский способ дал преуменьшение в 3, 5% против швейцарского, который считался более верным, а примененный — преуменьшение в 0,7%. Для того чтобы последнее преуменьшение совсем уничтожить, надо было бы на кривой расходов последнюю ординату считать не в 50, а в 74% предпоследней. Для опыта III последнее преуменьшение оказалось в 1%.

В Москве же был высчитан для опыта III коэффициент α Кориолиса, исправляющий скоростный напор, вычисленный по средней скорости. Он оказался равным 1,106 при площади сечения 1,9904 м², средней скорости $v_m = 0,649$ м/сек, расходе (по швейцарскому способу) 1,292 м³/сек. Были построены эпюры, так же, как это сделано в середине и внизу рис. 8, две эпюры для v и две для v^3 . Планиметрирование первой эпюры дало расход и v_m , а последней — величину $\int v^3 d\omega$, где ω — площадь. Коэффициент Кориолиса вычислялся по формуле:

$$\alpha = \frac{\int v^3 d\omega}{v_m^3 \omega}.$$

Однако ни один из трех примененных способов построения эпюр скоростей около стенок сечения не является научно обоснованным; за-кавказский способ наверно преуменьшает расход; результаты подсчета по швейцарскому способу зависят от случайного соотношения принятых масштабов длин и скоростей на эпюре.

Уже после ленинканских исследований мы выработали следующий способ экстраполирования этих эпюр на основании существующих научных взглядов на распределение скоростей в турбулентных потоках. В настоящее время принимается ¹⁾, что скорость v_1 в точке потока, отстоящей от стенки в расстоянии y_1 , есть:

$$v_1 = ay_1^{\frac{1}{n}}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что площадь эпюры скоростей между стенкой и ближайшей точкой замера есть:

$$\omega = \int_0^{y_1} v dy = \frac{an}{1+n} y_1^{\frac{n+1}{n}} = \frac{nv_1 y_1}{1+n}. \quad (2)$$

При известных v_1 , y_1 и n эта площадь легко вычисляется, хотя бы a и не было известно. Следовательно, эпюру надо планиметрировать не между стенками, а между двумя крайними точками замера, а затем добавлять две боковых вычисленных площади ω . Приблизительным значением v приходится задаваться.

При желании иметь полную эпюру (для наглядности или для вычисления площади как суммы трапеций) можно ограниченную кривой (1) площадь ω заменить равновеликой трапецией с основанием y_1 и неравными сторонами v_1 и v_0 , где v_0 есть фиктивная скорость у самой стенки. По формуле трапеции вычисляем эту скорость:

$$v_0 = \frac{2\omega}{y_1} - v_1 = v_1 \frac{n-1}{n+1}. \quad (3)$$

Так как эпюру элементарных расходов можно рассматривать как эпюру условных скоростей при постоянной глубине (или ширине) потока, то и к ней применим тот же прием.

Для применения способа надо знать знаменатель n показателя потока. Он принимался прежде равным семи; с расширением опытных исследований оказалось, что он меняется в зависимости от Рейнольдсова числа N . Никурадзе исследовал распределение скоростей в потоке в широких пределах этого числа — от ста до десяти миллионов. По его данным ²⁾ можно выразить n как функцию от $N = \frac{vd}{\nu}$, где v — сред-

¹⁾ Например Г. Ф. Проскура — Экспериментальная гидроаэродинамика, 1933, стр. 74 и 182.

²⁾ J. Nikuradse — Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren, 1932 (Forschungsheft 356), Abbildung 39.

няя скорость в трубе в см/сек , d — диаметр трубы в см , ν — кинематическая вязкость, равная для воды около $0,01 \text{ см}^2/\text{сек}$. Мы для практической гидрометрии предпочитаем однако связать n со скоростью, выраженной в м/сек , и с гидравлическим радиусом R в м . Тогда из опытных данных Никурадзе возможно установить зависимость:

$$n = 10 (R\nu)^{0,07}. \quad (4).$$

Эта формула и может быть применена для вычисления n .

Некоторой натянутостью метода остается распространение опытных данных, полученных на круглых трубах, к каналам других сечений.

Применяя предлагаемый способ к нашему случаю (опыт I, рис. 16) имеем $R = 0,439 \text{ м}$ и $v = 0,411 \text{ м/сек}$, т. е. $Rv = 0,180$; отсюда по формуле (4) $n = 8,87$ и $v_0 = 0,798 v_1$. Дальнейшая обработка приводит к $Q = 0,673 \text{ м}^3/\text{сек}$, т. е. почти полному совпадению со швейцарским способом, что, однако, является следствием случайно удачного выбора масштабов эпюры при последнем.

Рекомендуемый способ легко распространяется на вычисления с круглыми сечениями при соответствующем изменении формул (2) и (3).

6. К. П. Д. ТУРБИН ПО ВЫЧИСЛЕНИЯМ НА МЕСТЕ.

Во время замеров расхода в здании станции, соединенном с вододелителем временным телефоном, трое наблюдателей производили замеры силы тока, напряжения и мощности по ваттметру, а также коэффициента мощности по соответствующему указателю. Кроме того производились

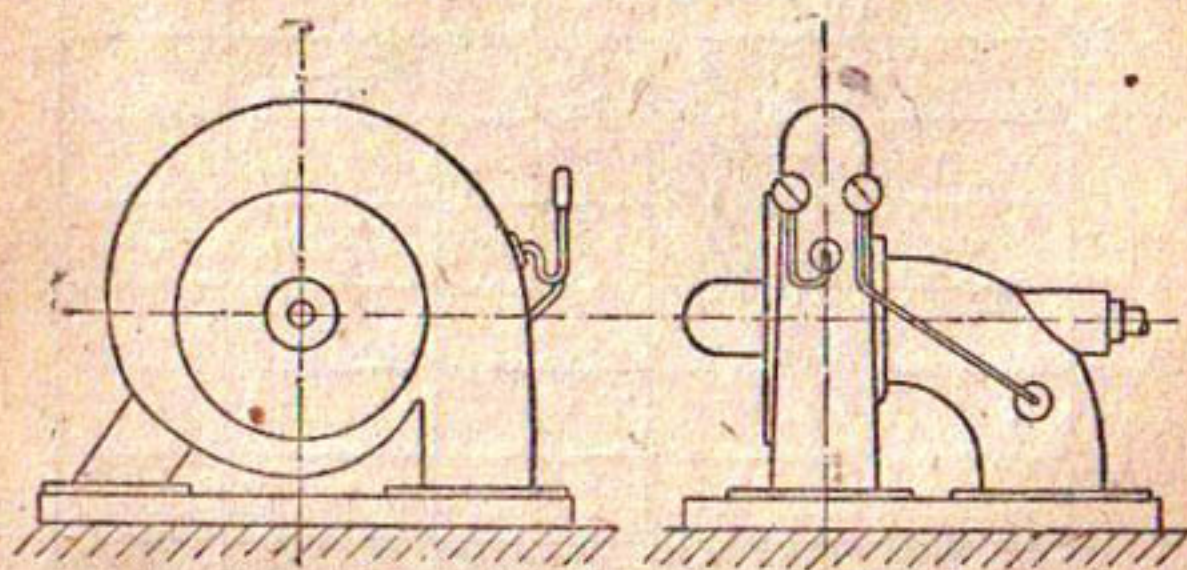


Рис. 17. Место присоединения манометра и вакуумметра.

замеры давления перед турбиной по прецизионному манометру, ее открытия по указателю, разрежения во всасывающей трубе по заводскому вакуумметру, числа оборотов по заводскому тахометру, нижнего горизонта по рейке и управляли реостатом.

Результаты наблюдений с учетом поправок приборов и вычислений сведены в табл. 4.

Испытание турбины № 1/18 9 июня 1929 г.

№ опыта	I	II	III
Открытие по указателю F (%)	35	50	65
Давление по манометру вод. ст. h_2 (м)	109,0	107,0	106,0
Скоростной напор h_2	0,60	1,24	2,17
Верховой напор $h_4 = h_2 + h_3$	109,60	108,74	108,17
Низовой напор h_3	4,640	4,615	4,365
Рабочий напор $H_1 = h_4 + h$	114,240	113,355	112,535
Расход Q (м ³ /сек)	0,675	0,967	1,279
Мощность генератора N_2 kW	533,52	831,60	1 112,40
N_2 л. с.	725,6	1 137,0	1 512,9
К. п. д. генератора η_2 (%)	92,2	94,2	94,9
Мощность турбины N_1 л. с.	787,0	1 207,0	1 592,6
Число оборотов n мин.	750	750	750
К. п. д. турбины η (%)	77,0	82,6	83,2

К ней надо добавить, что скоростной напор вычислялся по расходу и скорости в патрубке перед турбиной, диаметр которого за отсутствием чертежей принят предположительно в 0,5 м.

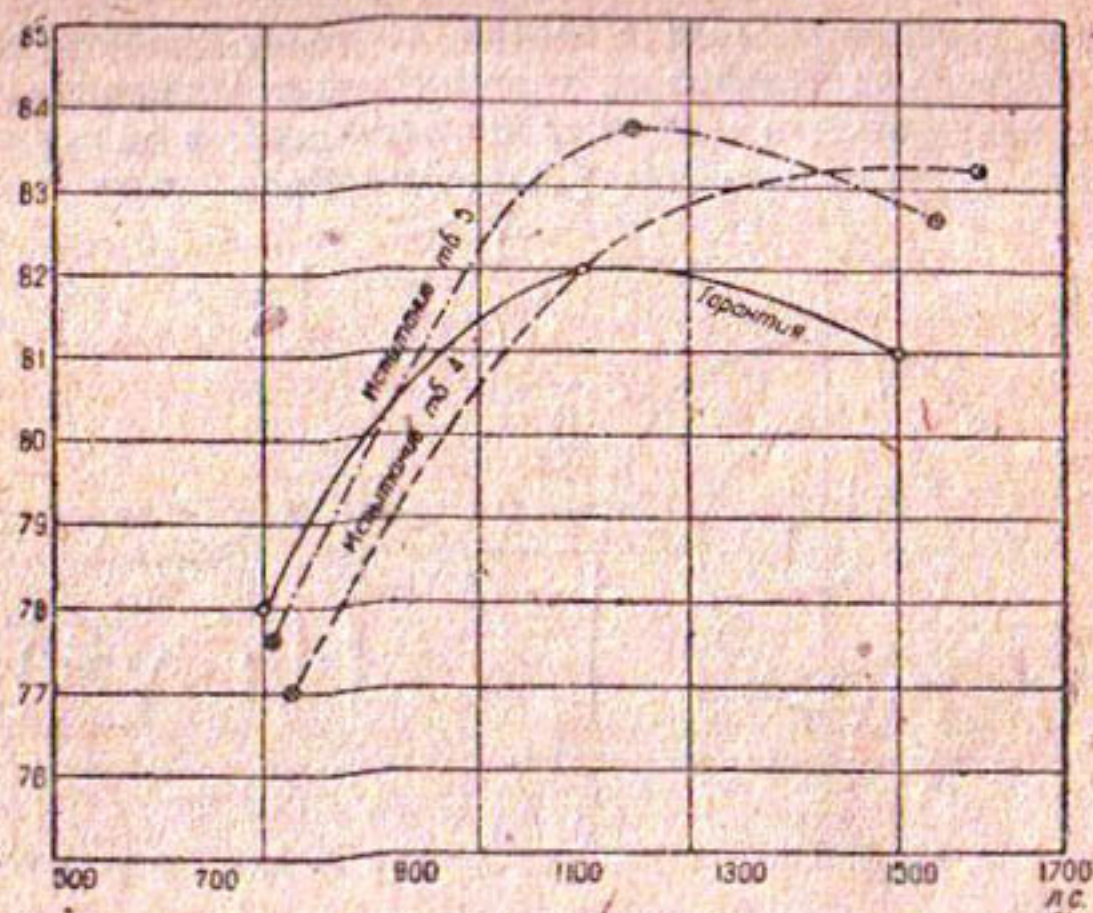


Рис. 18. Сравнение к. п. д. турбины по гарантии и опытам.

Присоединение заводского манометра (на место коего был поставлен прецизионный) нельзя считать удачным. Присоединение было сделано не к цилиндрическому патрубку, а к самой спирали, в начальной ее части (рис. 17).

К. п. д. η_{12} генератора вычислялся интерполированием по таким данным:

нагрузка	100	75	50%
к. п. д.	95	94	92%

При вычислении предполагалось, что нагрузка в 100% обозначает нагрузку турбины в 1500 л. с.

Выяснилось также, что отклонение рабочего напора от указанного в договоре (110 м) и на дощечке турбины (114 м) невелико.

Результаты табл. 4 нанесены на рис. 18 и 19. Из них можно заключить:

1) что при мощностях, указанных в договоре, найденные к. п. д. отличаются от гарантированных на такие величины:

Мощность	1500	1125	750 л. с.
Гарантия	80,0	82,0	78,0%
Опыт	83,1	82,0	76,5%
Отличие	+ 3,1	± 0	- 1,5%

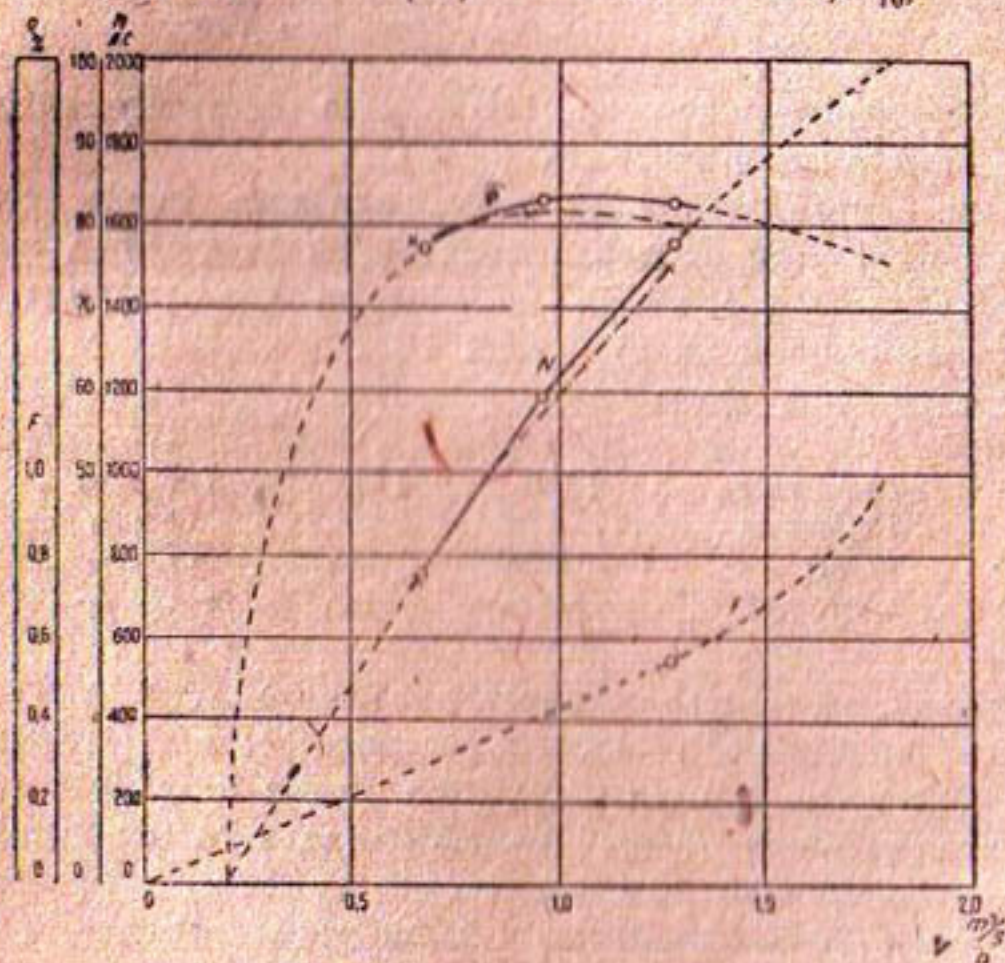


Рис. 19. Характеристика турбины.

т. е. при больших мощностях турбина работает со значительно лучшими к. п. д., а при малых — с худшими;

2) что турбина имеет полную мощность, значительно большую номинальной (примерно до 2000 л. с.).

Приемщик признал, что эти данные вполне удовлетворительны, и ввиду сходства агрегата II с I испытания второй турбины не производилось.

Повторного испытания регуляторов не производилось. Была сделана лишь проба параллельного включения II агрегата. Включение прошло быстро и легко.

7. К. П. Д. ТУРБИН ПО ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВЫЧИСЛЕНИЯМ.

Означенные вычисления, произведенные спешно на месте, можно несколько уточнить:

1. Швейцарский способ вычисления расхода даст, как сказано, расход на 0,7 — 1% больший принятого.
2. Желательно перечисление данных на напор, указанный в договоре.
3. В данные о к. п. д. генератора, использованные на месте, кажется, вкралась ошибка, а именно: постановлением комиссии было решено взять коэффициенты заводских испытаний, а вычислителям были даны коэффициенты гарантированные (см. выше). Данные заводских испытаний приведены в упомянутом номере Известий ГЭТ (стр. 24), и они при коэффициенте мощности 1 таковы:

Нагрузка	100	75	50%
η_2	94,5	92,5	91,0%

Надо предположить, что за 100%-ную нагрузку здесь считается не 1500 л. с. турбины, а 1300 kW (§ 2).

4. Наконец в вычисления на месте вкралась очень мелкие арифметические ошибки (при переводе отметок из саженей в метры).

Пересчет таблицы 4 с этими поправками дает таблица 5 (которую мы даем в более полном виде) и рис. 18.

Сравнение с гарантией дает:

Мощность	1500	1125	750 л. с.
Гарантия	80,0	82,0	78,0%
Опыт	83,0	83,7	77,5%
Отличие	+3,0	+1,7	-0,5%

Характеристика турбины остается прежней — к. п. д. выше гарантии при больших нагрузках и несколько ниже ее при малых. Характер опытной кривой к. п. д. стал несколько ближе к кривой гарантии.

Из данного примера очень хорошо видна необходимость особой точности и осторожности при испытаниях турбин. В особенности тщательными должны быть измерения и вычисления расхода, и должен быть точно известен к. п. д. генераторов. При измерении расхода, если нет возможности применить два метода его измерения (например вертушки и водослива), следует работать не менее как двумя вертушками (имея третью в запасе) со взаимной их поверкой.

8. СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБОПРОВОДА.

Из табл. 5 можно получить потерю напора в трубопроводе $h_t = h_1 - h_4$; разделив ее на Q^2 , получаем коэффициент сопротивления a_1 в формуле $h_t = a_1 Q^2$ (табл. 6).

Среднее значение a_1 есть 1,44 при среднем квадратичном отклонении 12%. Сравним это значение с теоретическим расчетом.

Пересчет таблицы 4

№ опыта	I	II	III
Срок опыта (мин.)	105	63	38
Открытие по указателю F (%)	5	50	65
Отметка верхнего уровня ∇_1 (м)	1 659,963	1 660,095	1 660,089
Показание нижней рейки h_x (м)	— 0,235	— 0,210	— 0,160
Отметка нижнего горизонта $\nabla_2 =$ $= 1 545,352 + h_x$ (м)	1 545,117	1 545,142	1 545,192
Полный напор $H_1 = \nabla_1 - \nabla_2$ (м)	114,846	114,953	114,897
Напор статич. у манометра $h_1 = \nabla_1 -$ $- 1 549,755$ (м)	110,208	110,340	110,334
Давление по манометру вод. ст. h_2 (м)	109,0	107,5	106,0
Скоростной напор h_3 (м)	0,60	1,24	2,17
Верховой напор $h_4 = h_2 + h_3$ (м)	109,60	108,74	108,17
Низовой напор $h_5 = 1 549,755 - \nabla_2$ (м)	4,638	4,613	4,563
Рабочий напор $H_2 = h_4 + h_5$ (м)	114,238	113,353	112,733
Разрежение по вакуумметру вод. ст. h_6 (м)	4,20	5,22	6,18
Поправка к расходу %	+ 0,7	+ 0,9	+ 1,0
Расход Q_1 (м ³ /сек)	0,680	0,976	1,292
Мощность генератора N_2 kW	533,52	831,60	1 112,40
Мощность генератора N_2 л. с.	725,6	1 137,0	1 512,9
К. п. д. генератора η_2 (%)	90,4	91,8	93,2
Мощность турбины $N_1 = N_2 : \eta_2$ л. с.	804	1 239	1 605
Число оборотов n_1 мин	750	750	750
К. п. д. турбины $\eta = \frac{7 \gamma N_1}{Q \gamma H_2}$ (%)	77,63	84,00	82,67
Пересчет на напор 110 м			
Расход $Q = Q_1 \sqrt{\frac{110}{H_2}}$ м/сек	0,667	0,961	1,117
Мощность $N = N_1 \sqrt{\frac{110}{H_2}}$ л. с.	760	1 183	1 537
Число оборотов $n = n_1 \sqrt{\frac{110}{H_2}}$ мин.	736	739	741

Таблица 6

Потери в трубопроводе

№ опыта	I	II	III
h_1 (м)	110,208	110,340	110,334
h_4 (м)	109,600	108,740	108,170
h_c (м)	0,608	1,600	2 164
Q (м ³ /сек)	0,680	0,976	1,292
$\alpha_1 = h_c : Q^2$	1,33	1,68	1,30

Потеря напора в трубопроводе (рис. 10 и 11) выражается:

$$h_{\tau} = \left(\zeta_1 + \zeta_2 + \frac{l_3}{d_3} \right) \frac{v_3^2}{2g} + \left(\zeta_4 + \lambda_5 \frac{l_5}{d_5} \right) \frac{v_5^2}{2g} + \\ + \left(\zeta_6 + \lambda_7 \frac{l_7}{d_7} \right) \frac{v_7^2}{2g} + \left(\zeta_8 + \zeta_9 + \lambda_{10} \frac{l_{10}}{d_{10}} \right) \frac{v_{10}^2}{2g}.$$

Здесь $d_3 = 1,2$; $d_5 = 0,9$; $d_7 = 0,75$; $d_{10} = 0,6$ м; v_3, v_7, v_{10} — соответствующие скорости; приблизительно: $l_3 = 216$; $l_5 = 3,2$; $l_7 = 3,9$; $l_{10} = 5,6$ м. В расчетах при проектировании было принято: коэффициент потери при входе $\zeta_1 = 1$; коэффициент потери на 8 закруглениях при отношении $\frac{R}{d} \geq 5$ — $\zeta_2 = 8 \cdot 0,15 = 1,2$; потеря в трубе при $v_5 = 2,26$ м/сек 6 мм на 1 м длины. Последнему значению соответствуют $\lambda_5 = 0,0277$ и коэффициент шероховатости: Гангиле и Куттера $n = 0,0155$; Куттера $m = 0,481$; Базена $\gamma = 0,345$; длина трубы при подсчете принята $l_5 = 228$ м. Все эти коэффициенты кажутся преувеличенными, но зато в проекте не учитывались остальные потери на ответвлении № 4 — 10.

Вычислим далее λ . По тому же Куттерову $m = 0,481$: $\lambda_3 = 0,0317$; $\lambda_7 = 0,035$; $\lambda_{10} = 0,0393$.

Примем коэффициенты потерь: на разветвлении $\zeta_4 = 1$; на повороте $\zeta_6 = 0,15$; на внезапном расширении и сужении в раздвижном звене $\zeta_8 = 0,2$; на последнем закруглении $\zeta_9 = 0,15$.

Далее выражаем скорости через расход и диаметры и получаем:

$$h_{\tau} = (0,040 + 0,048 + 0,211) Q^2 + \\ + (0,130 + 0,014 + 0,040 + 0,047 + 0,128 + 0,096 + 0,237) Q^2 = \\ = 0,299 Q^2 + 0,692 Q^2 = (\alpha_2 + \alpha_3) Q^2 = \alpha_4 Q^2 = 0,991 Q^2.$$

Здесь коэффициент потерь в главном трубопроводе $\alpha_2 = 0,299$, в ответвлении $\alpha_3 = 0,692$. Определенный опытом коэффициент потерь $\alpha_1 = 1,44$ оказывается больше подсчитанного $\alpha_4 = 0,991$ на 45%, что представляет большое расхождение (при испытаниях Боровенской гидростанции это расхождение было 18%).

По подсчету потери в ответвлении составляют $\frac{\alpha_3}{\alpha_4} = 70\%$ от полных. При работе трубопровода на две турбины α_3 падает примерно в 4 раза, и потери в ответвлении составят лишь 37% от общих потерь, но все же это такая большая доля, что при проектировании ею пренебрегать нельзя. Для работы трубопровода может быть предположительно составлена табл. 7. Процентные потери (строка 7) надо признать умеренными.

Значительное отклонение замеренных (хотя бы с некоторой ошибкой) потерь против подсчитанных указывает на желательность особых исследований выстроенных трубопроводов с тщательным выбором мест

Вероятные потери в трубопроводе

	1	2
Число турбин в работе	1	2
Расход Q (м ³ /сек)	1,28	2,56
Скорость v (м/сек)	1,13	2,26
Коэффициент скорости V в формуле $v = V \sqrt{2gH}$	0,024	0,048
Коэффициент α_1	1,440	0,685
Потеря h_s (м)	2,36	4,50
То же в долях напора (%)	2,05	3,92

присоединения манометров, с учетом поправки к вычисляемой по средней скорости живой силе, с определением потерь на отдельных участках при работе как одной, так и нескольких турбин. Это даст указания на причины отклонений.

9. ОПУСТЕНИЕ (КАВИТАЦИЯ).

Согласно указанным в § 2 номинальным данным для турбины (напор 110 м, мощность 1 500 л. с., число оборотов 750), удельное число оборотов ее вычисляется:

$$n_s = \frac{n}{H} \sqrt{\frac{N}{VH}} = 82.$$

Если при полном открытии она предположительно даст 2 000 л. с (§ 6), то тогда будем иметь $n_s = 94$.

Указанная выше комбинация напора и мощности обуславливает скорее выбор колеса Пельтона, чем турбины Френсиса. Так, по американским данным (рис. 20 по W. P. Creager and J. D. Justin — Hydroelectric Handbook, стр. 577, пересчитано на метры) при мощности 1 500 л. с., при напорах свыше 105 м, рекомендуется определению колесо Пельтона, при напорах от 70 до 105 допускается выбор той или другой системы и при напорах меньших 70 — только Френсис.

Эта рекомендация основывается, главным образом, на боязни явления опустения. По формуле Тома наибольшая допустимая высота всасывания получится из формулы:

$$\frac{10 - h_a - h_s}{H} = \sigma.$$

Здесь 10 м — приблизительная высота вод. ст., соответствующая барометрическому давлению на уровне моря; h_a — снижение этой высоты на отметке a м (приблизительно $h_a = \frac{a}{900}$); σ — наименьший коэффи-

Засовывая в люк голову или руку, можно было увидеть или нащупать следующее. Преимущественно работавшая с декабря по июнь (5 мес.) с неполной нагрузкой турбина I имеет бронзовое колесо с залитыми листовыми лопатками. На коническом внутреннем ободе, переходящем во втулку (рис. 21), сошла окраска и обнажилась бронза непосредственно за выходом воды из-под всех лопаток, преимущественно около тыловой стороны лопаток. Против двух из лопаток в средине этого обнажения в теле бронзы видны язвины, против одной около 20 мм длиной, против другой — меньше. Окраска на лопатках сохранилась. Однако возможно предположение, что эти углубления произошли еще при отливке колеса и при работе лишь обнаружили. У турбины II (с литым стальным колесом при листовых же лопатках), работавшей значительно меньше, окраска сохранилась везде.

Комиссия постановила: „Признать, что в настоящий момент явного признака вредного действия кавитации нет. Однако соотношения между напором, удельным числом оборотов, высотой всасывания и высотой над уровнем моря, с одной стороны, ясно выраженный сход окраски в характерных местах колеса — с другой, позволяют опасаться разъедания колеса в течение более продолжительного времени. Поэтому персоналу станции надлежит осматривать отмеченные места колес каждые 3—6 мес.“.

Желательно, конечно, было бы при этом осматривать и вход в колесо и колено всасывающей трубы.

10. БОРЬБА С ШУГОМ.

В зимнее время р. Арпачай несет довольно большое количество шуги — взвешенного игольчатого льда. При проектировании станции предполагалось, что достаточно хорошо изолировать зимой тоннель, распределитель, канал и бассейны от охлаждения наружным воздухом, чтобы повышенная температура тоннеля растопила значительную долю шуги и сделало ее безвредной. Для этого рекомендовалось заменить решетку перед тоннелем спускным деревянным щитом, закупорить все отверстия тоннеля, покрыть открытое русло канала деревянными щитами, и лишь на случай неудачи этих мер предполагалось поставить электрически нагреваемую решетку перед входом в трубопровод. Последняя поставлена не была, остальные же меры не принесли ожидаемой пользы: в первую же зиму тоннель засорился льдом полностью. При некотором опыте и внимании закупоривания тоннеля можно избежать, а чтобы турбинные решетки не засаривались было сделано следующее.

Концевая часть напорного бассейна прикрыта тесовым навесом, со стенок бассейна на канатах над самой поверхностью воды под этим

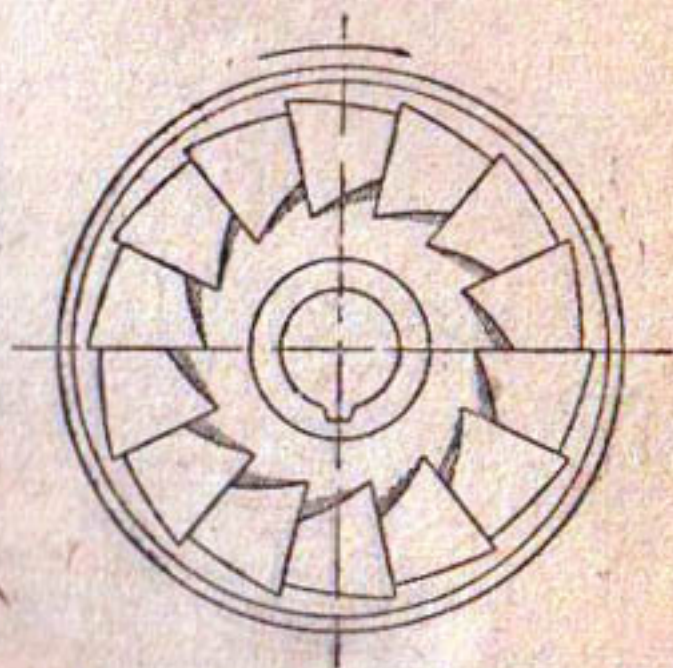


Рис. 21. Эскиз колеса I снизу.

навесом подвешена платформа из досок с широкими прозорами. Боковой донный грязеспуск переделан на поверхностный ледоспуск. В холодное время большое количество рабочих, стоя на этих досках, сгоняют всплывшую шугу в ледоспуск, не допуская ее до решеток. Борьба таким способом со льдом и шугой на напорном бассейне и в быстротоке Эриванской гидростанции (при несколько более теплом климате)

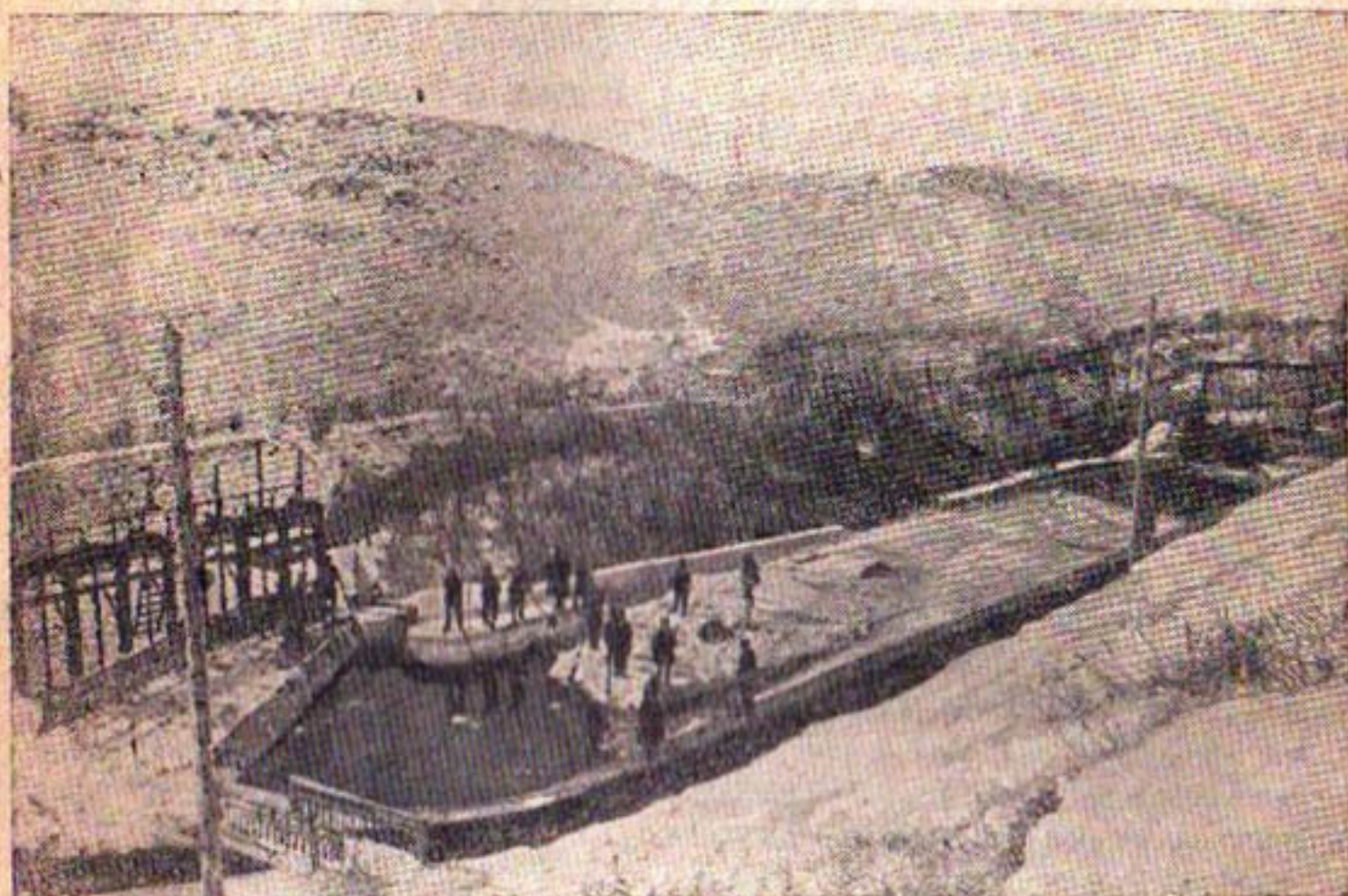


Рис. 22. Чистка от льда напорного бассейна Эриванской гидростанции.

изображена на рис. 22 и в предыдущей статье Ничипоровича „Исследование быстротока Эриванской гидростанции“ на рис. 38. Конечно такой способ борьбы не является идеальным, и следует думать об его усовершенствовании¹⁾.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ МИЛЯТИНСКОЙ ГИДРОСТАНЦИИ.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.

Осенью 1930 г. Милятинская древеснобумажная фабрика обратилась в Государственный институт сооружений с просьбой дать заключение о работе ее водяной турбины. Секция исследования гидростанций гидросектора Института была в это время сильно загружена исследованиями других, более мощных гидростанций. Однако, идя навстречу потребностям промышленности, хотя бы и мелким, Институт сооружений принял

¹⁾ Со времени написания этой статьи (1930 г.) на гидростанции поставлены турбины и трубопровод второй очереди; разъедание на турбинах первой очереди стало очевидно; для борьбы с шугой приняты широкие меры.

поручение фабрики, тем более, что, как выяснилось, она уже пыталась получить заключение от других учреждений, но встретила везде отказ.

Исследования были произведены в ноябре 1930 г. заведующим секцией Н. М. Щаповым и сотрудником секции С. И. Погарским.

Фабрика, основанная несколько десятков лет назад, производит картон и пакетную бумагу из вырабатываемой ею же древесной массы. Сырье (еловый баланс) получается из общего лесного массива (около 30 000 га), расположенного поблизости. В 1929/30 г. производительность равнялась 2 600 т при стоимости по отпускной цене 72 000 руб.

Имеются три паровых машины на 500, 30 и 60 л. с., мощность коих достаточна для работы всей фабрики. Последняя из трех двигает бумажную машину („черпалку“). Во время ремонта этой паровой машины (неполадки нередки) на черпалку работает, потребляя 20 kW, электромотор, приводимый в движение током от водяной турбины. При остановке основной паровой машины динамомашинная водяная турбина обслуживает и освещение. Таким образом турбина является необходимым резервным двигателем; при достаточной воде она работает в помощь паровой силе, экономя топливо. Смотри по водности года, продолжительность ее работы составляет 30—60 суток в год.

Управление фабрики сомневалось в исправной работе турбины и находило, что турбина при наличных запасах воды должна была бы вырабатывать большую мощность. Для ответа на этот вопрос и были проведены исследования секцией.

2. ГИДРОСТАНЦИЯ.

Фабрика расположена в Спас-Деминском районе Западной обл. (б. Масальский у., Калужской губ.) на р. Вороне (система притоков: Ворона — Угра — Ока — Волга). Бассейн стока у плотины по десятиверстной карте определяется в 90—100 км². Земляная плотина образует пруд площадью (по разным планам) от 1,5 до 3 км².

Плотина прорезана (рис. 1) деревянным водоспуском и деревянным приводным к турбине лотком прямоугольного сечения, шириной 1,82 м и длиной около 40 м. Перед входом в лоток — решетка; половина ее из стоячих деревянных брусков с прозорами 4 см, другая — железная из перекрестных наискось прутьев (очевидно, звено бывшего садового забора) с отверстиями 6 × 6 см. Между решеткой и деревянными заставками лоток около самого проезжего моста открыт сверху.

Лоток заканчивается (рис. 2 и 3) бревенчатым рубленным колодцем, непосредственно переходящим в прямоугольную такую же камеру, в которой стоят две вертикальные турбины; перед колодцем — опускной щит.

Плотина, очевидно, давней постройки. Гидростанция выстроена силами самой фабрики в 1925 г. Турбины взяты после соответствующего ремонта (приклепка новых рабочих лопаток, смена направляющих) со склада другой какой-то фабрики, где они раньше были в работе.

По осмотру турбины оказались системы Френсиса, типа Success (Успех), завода Morgan Smith (York, США) с подводными бакаутowymi

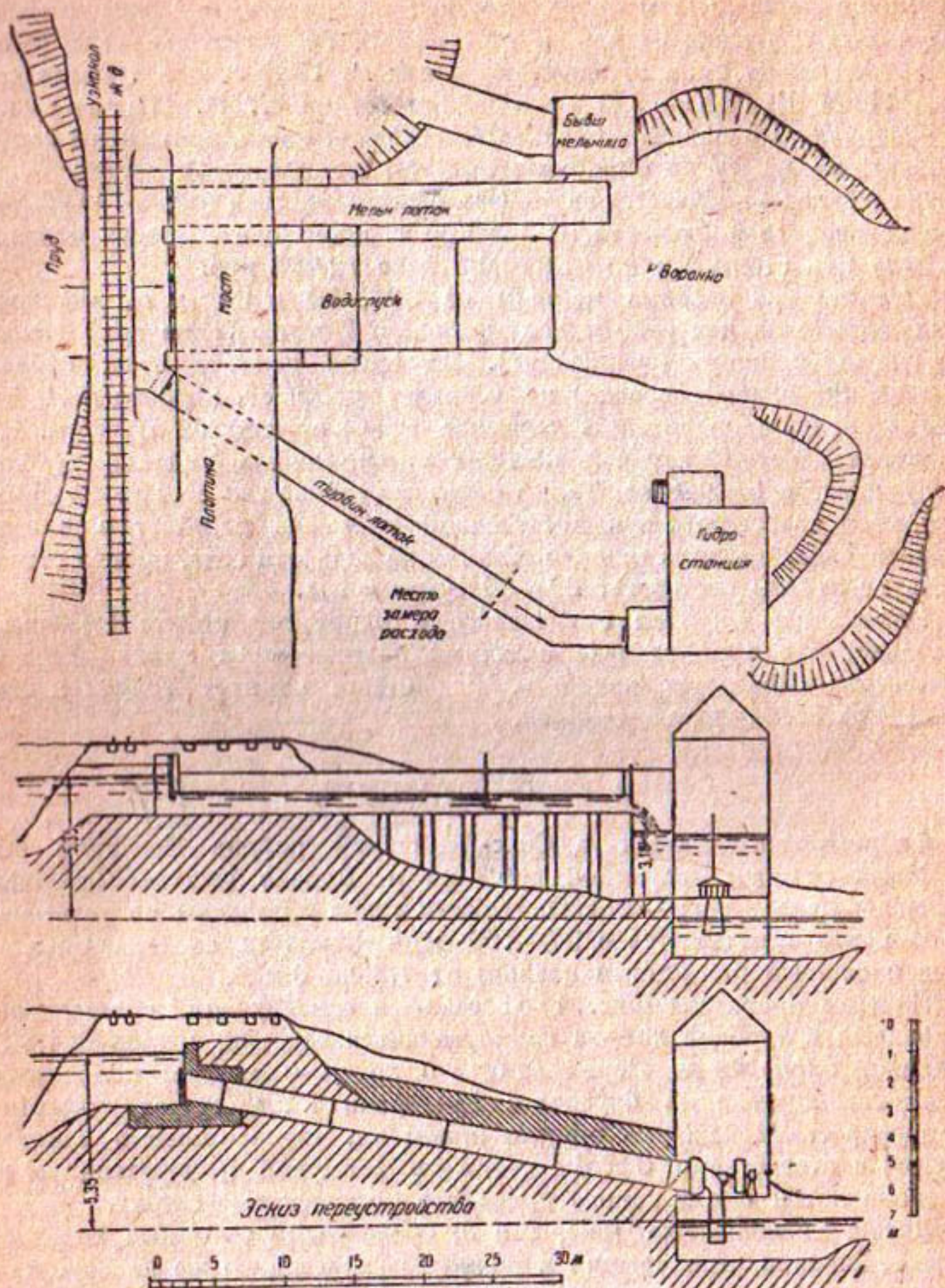


Рис. 1. План и разрезы гидростанции.

пятами. Привод от малой турбины из-за нехватки воды позже был разобран, а направляющий аппарат заглушен деревянными вставками. У большой турбины наружный диаметр направляющего аппарата оказался равным 1,77 м, его высота 0,42 м, диаметр рабочего колеса 1,25 м. Турбина сильно изношена, направляющие лопатки хлябают около своих

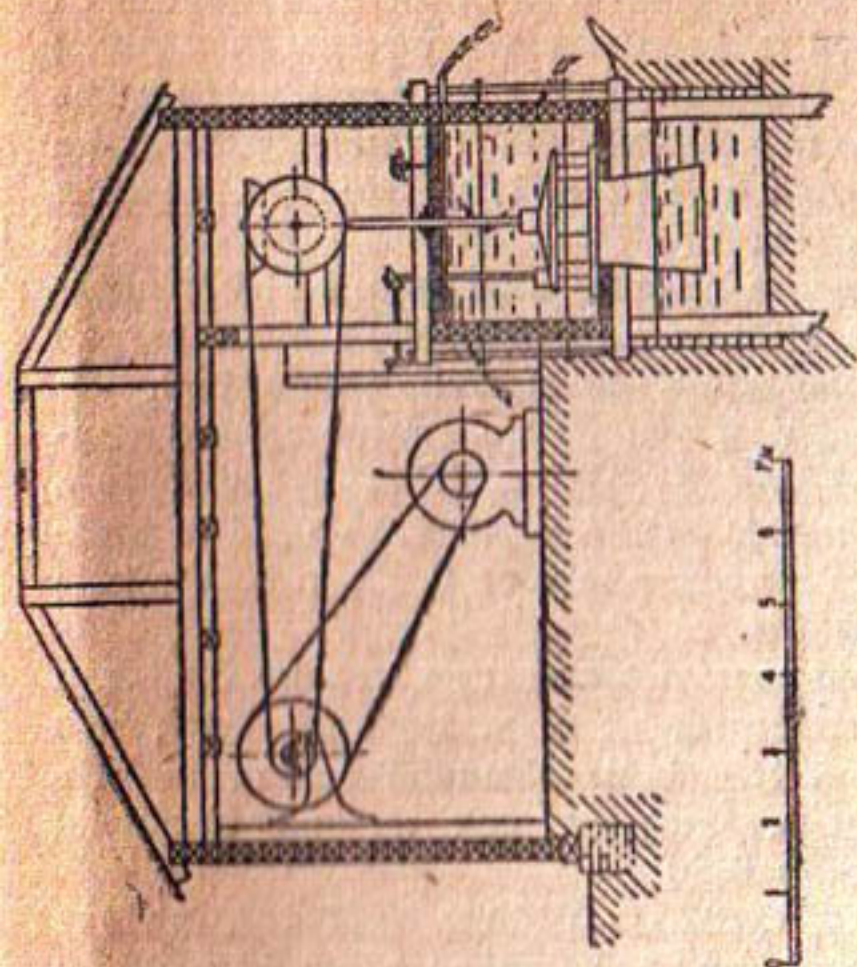


Рис. 2. Разрезы машинного здания.



Рис. 3. Вид на гидростанцию.

осей и перекашиваются, их хвосты имеют большой мертвый ход (до 5 см) при регулировании. Опорные болты крышки шатаются, вал бьет, бакаутный подшипник занесен сором, кленовые зубья шестерни часто меняются. При осмотре в направляющем аппарате и в рабочем колесе найдено много кусков дерева до $18 \times 10 \times 10$ см, палки до 100 см длины, а в камере даже полено 50×20 см. Часть чурок могла проскочить через решетку, другая — перекинута волной через нее или свалилась с моста в лоток ниже решетки.

Через зубчатую передачу и две ременные работа передается от турбины динамомашине постоянного тока завода „Динамо“ (в Москве) на 800 оборотов, 230 V, 67 kW.

3. ИСПЫТАНИЯ.

Из-за нагрева одного из подшипников малой паровой машины 1 ноября была пущена (после очистки от засорения) турбина так, как она обычно работает.

Ватерпасом по горизонтальной рейке полный напор определен в 5,35 м. Однако из-за потерь в приспущенном щите у решетки в лотке (0,70 м) и щите у камеры (1,47 м) рабочий напор оказался всего лишь в 3,18 м. Замер расхода в лотке вертушкой при глубине 0,90 м на 4 вертикалях в 12 точках дал расход в 1,77 м³/сек; площадь сечения 1,638 м², средняя скорость 1,08 м/сек.

Число оборотов турбины (открытие полное) замерено в 113,7; передаточное число зубчатой передачи 1,08, первой ременной 2,22, второй 2,27, итого полное 5,44, т. е. число оборотов динамомашинны 618.

Приборы на щите показали 163 В и 161 А, что соответствует мощности, отдаваемой в сеть 28,2 kW или 35,7 л. с. Если предположить к. п. д. зубчатой передачи 0,90, каждой из ременных по 0,95 и динамомашинны 0,85, то общий к. п. д. передачи будет 0,69, т. е. турбина вероятно давала при испытании 51,8 л. с.

Сравнивая эту мощность с мощностью воды при напоре 3,18 м и расходе 1,77 м³/сек, получаем вероятный к. п. д. турбины 0,69, что для турбины старой конструкции и сильно изношенной нельзя назвать малым. Вероятно, и у новой этот коэффициент при полном открытии достигал лишь 0,77, а при частичном 0,80.

Несмотря, однако, на удовлетворительную работу турбины, работу гидростанции нельзя назвать здоровой, так как из полного напора в 5,35 м использовался рабочий напор лишь в 3,18 м; из остальной части около 0,15 м неизбежно терялось в лотке, а 0,55 и 1,47 м намеренно гасилось в двух приспущенных щитах. Если бы этого гашения не было, то рабочий напор достиг бы 5,2 м, и мощность турбины при том же расходе и к. п. д. достигла бы 84,4 л. с., т. е. на 63 % больше.

Как оказалось, при данных условиях это гашение необходимо, так как деревянная рабочая камера и колодец не могут держать полного напора — они текут; малейший дополнительный подъем щита у камеры вызывает целые потоки воды из потолка камеры, заливающие машинный зал и динамомашину. Были случаи, когда лопались стяжки камеры и вырывались брусья из ее боков. Во избежание подобных явлений из-под потолка камеры выведено несколько предохранительных трубок (рис. 2), выпускающих воду наружу при переполнении камеры.

Конструкция камеры такова, что нет надежды на приведение ее в полную исправность; она ограничена большими плоскими стенками из плохо пригнанных бревен (хотя и с пазами, но на конопатке), без хорошей системы уплотняющих стяжек.

4. ЧИСЛО ОБОРОТОВ ТУРБИНЫ.

Для исправной работы турбины важно соответствие ее оборотов с рабочим напором. Связь между ними зависит от быстроходности и размеров турбины. Не имея заводских или каталожных данных о турбине, попытаемся найти эту связь по ее обмеру.

Отношение высоты колеса к его входному диаметру оказалось:

$$\beta = \frac{b}{D_1} = \frac{0,42}{1,25} = 0,336.$$

Возьмем таблицу 1 турбин Френсиса¹⁾. Из нее видно, что указанному β соответствует удельное число оборотов n_s около 275 и коэффициент окружной скорости $U_1 = 0,79$ или сама скорость при нашем рабочем напоре 3,18 м:

$$u_1 = U_1 \sqrt{2gH} = 0,79 \sqrt{2g \cdot 3,18} = 6,25 \text{ м/сек.}$$

Таблица 1

n_s	50	100	150	200	250	300	350
$\beta = \frac{b}{D_1}$	0,03	0,09	0,16	0,23	0,30	0,37	0,44
$\delta = \frac{D_2}{D_1}$	0,62	0,75	0,87	1,00	1,12	1,25	1,37
U_1	0,58	0,62	0,67	0,72	0,76	0,81	0,86

При диаметре 1,25 м это дает:

$$n = \frac{60u_1}{\pi D_1} = 95 \text{ об/мин.}$$

Испытываемая турбина делала 114 оборотов, т. е. ненормально много; несмотря на это динамомашинка давала лишь 618 оборотов вместо нормальных для нее 800 и 163 V вместо 230. Отсюда следует, что передаточное число мало.

Из полученных на фабриках сообщений видно, что раньше малый шкив на стене (рис. 2) был раза в два меньше, но после его поломки заменен шкивом случайного размера. Если бы первый был восстановлен и передаточное число увеличено до 9, то 800 оборотов динамомашинны и ее нормальное напряжение достигались бы при 89 оборотах турбины, т. е. при близком к подсчитанному нами, и к. п. д. турбины вероятно вырос бы²⁾.

Если бы турбинную камеру было возможно сделать плотной, то турбина работала бы под напором не 3,18, а 5,2 м; число ее оборотов должно быть повышено пропорционально корням из напоров:

$$n = 95 \sqrt{\frac{5,2}{3,18}} = 120.$$

Отсюда следует, что передача должна была бы быть коренным образом переделана. В том же отношении вырос бы и расход, достигнув при полном открытии 2,26 м³/сек. Мощность достигла бы:

$$N = \frac{Q\gamma H\eta}{75} = \frac{2,26 \cdot 1000 \cdot 5,2 \cdot 0,69}{75} = 108 \text{ л. с.}$$

¹⁾ Шапов Н. М. — Подбор водяных турбин на основании их характеристик, Вестник инженеров, 1925, стр. 324; другие подобные таблицы см. Саткевич А. А. — Гидравлические турбины, 1929, стр. 207—211.

²⁾ Шапов Н. М. — Характеристики водяных турбин, Вестник инженеров 1925, стр. 165.

Диаметр вала в турбинах определяется (в сантиметрах) по формуле:

$$d = a \sqrt[3]{\frac{N}{n}}.$$

При 52 л. с., 95 оборотах и действительном диаметре 11 см вычисляем $a = 13,4$. При 108 л. с. и 120 оборотах a оказалось бы 11,2. Между тем по каталогу завода Бриглеб, Ганзен и К° a должно быть у вертикальных турбин:

при $\frac{N}{n} = 0,05$	0,1	0,2	0,5 и более
$a = 19$	17,5	16	14

В американских турбинах по заводским каталогам у подходящих турбин можно вычислить a тоже около 14.

Отсюда следует, что при напоре 5,2 м вал данной турбины (а вероятно, и другие детали) оказался бы недостаточно крепким и эксплуатация ее рискованной.

5. ВЫВОДЫ.

Все эти соображения приводят по отношению к мелятинской установке к таким выводам.

Маломощная с коротким валом турбина переставлена на сравнительно большой, неподходящий для нее напор; при нем ни турбина не может дать соответствующей мощности, ни деревянная камера быть плотной, поэтому турбина работает, используя не полный напор 5,2 м, а на 39% меньший.

Уменьшение напора производится искусственно прикрыванием щитов. По этой причине из того же расхода турбина извлекает не 84, а лишь 52 л. с.

Это гашение напора при теперешних условиях необходимо из-за неплотности деревянной камеры.

Если бы существующую камеру можно было сделать более прочной и плотной, то турбинное колесо могло бы при полном напоре пропустить на 28% больше воды и дать мощность около 108 л. с.

Однако при этом турбина должна делать около 120 оборотов, т. е. передача от нее к динамомашине должна быть заменена новой.

При этом вал турбины будет перенапряженным, и это исключает возможность такой переделки.

Существующая турбинная камера по своей конструкции такова, что ее наверное нельзя сделать плотной при значительно повышенном напоре.

Поэтому без коренного переустройства гидростанции следует лишь:

а) восстановить прежнее передаточное число между турбиной и динамомашинной для получения нормального напряжения;

б) озаботиться недопущением засорения турбины. Для этого необходимо поставить новую решетку в лотке, нарастить козырьком старые решетки и перекрыть лоток между последними и мостом;

в) по возможности уплотнить существующие колодец и камеру, стремясь к некоторому повышению напора или хотя бы к недопущению дальнейшего расстройств камеры.

Коренное же переустройство возможно с заменой теперешней камеры новой, более прочной и меньшей по размерам. Нет смысла в новую камеру ставить изношенную и неудобную турбину. Подходящим типом турбины является горизонтальная лобовая турбина в чугунном кожухе ¹⁾ с подводом воды трубопроводом или из конца лотка, или (еще надежнее) прямо из пруда (рис. 1, низ). Такая турбина при удельном числе оборотов n_s , равном 300, напоре 5,2 м, мощности 51 л. с. и к. п. д. 77%, давала бы 333 об/мин. пропуская расход 0,955 м³/сек. Такая турбина имела бы лишь одну ременную передачу, и к. п. д. последней и динамомашинны достиг бы 81% (вместо 69% в теперешних условиях). Динамомашинна отдавала бы в сеть 40,8 л. с. или 30 kW.

Если теперешняя установка, работая 60 дней в году, вырабатывает в год

$$60 \cdot 24 \cdot 26,2 = 37\,700 \text{ kWh}$$

и потребляет

$$60 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1,77 = 9\,160\,000 \text{ м}^3 \text{ воды,}$$

то новая при пониженном расходе 0,955 м³/сек могла бы работать:

$$\frac{9\,160\,000}{0,955 \cdot 3600 \cdot 24} = 112 \text{ суток,}$$

вырабатывая при этом 80 000 kWh в год.

Стоимость разницы энергии 42 000 kWh после капитализации укажет ту наибольшую капитальную затрату, которая еще является экономически выгодной при переустройстве гидростанции ²⁾.

¹⁾ Устройство и расположение такой турбины см., например, Шапов Н. М. — Исследование Боровенской гидростанции, 1930 г. (Сообщение № 20 Института сооружений).

²⁾ После написания этой статьи (1930 г.) в СССР освоены в разработке Гидроэнергетического института турбины Банки. Такая турбина вполне подошла бы к данным условиям и могла бы быть изготовлена на самой фабрике. См. И. В. Котенев и В. И. Иванов, — Турбина Банки — ГЭИ для сельских водяных установок, под ред. Н. М. Шапова, 1934 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>стр.</i>
Предисловие	3
Проф. ПОКРОВСКИЙ Г. И. и ИОФФЕ А. Я. Применение центробежной машины к моделированию земляных сооружений.	
1. Значение центробежной силы при моделировании земляных сооружений	5
2. Основные свойства поля центробежной силы	8
3. Конструкция центробежной машины	12
4. Определение угла устойчивого откоса	14
5. Определение угла устойчивого откоса смесей песка и глины	19
6. Исследование устойчивости откосов на деформируемом основании	21
7. Исследование устойчивости откосов запроектированного деривационного канала Волжской ГЭС у Самарской луки	25
8. О моделировании фильтрации	28
9. О моделировании капиллярных явлений	—
Проф. ПОКРОВСКИЙ Г. И. Применение киносъемки при исследовании деформаций моделей земляных сооружений на центрифуге	29
ИОФФЕ А. Я. К вопросу о влиянии глубины слабого пласта, залегающего под земляным откосом, на его устойчивость (Опыт теоретического исследования).	35
ИОФФЕ А. Я. Общая характеристика процесса внутреннего трения в грунтах.	42
ИСТОМИНА В. С. Быстротоки переменной ширины.	
1. Методы расчета	51
2. Опытная установка.	55
3. Производство опытов.	56
4. Результаты опытов по определению глубины в быстротоке	57
5. Глубина в начале быстротока.	58
6. Выбор формулы для учета шероховатости.	59
7. Сравнение результатов опытов с теоретическими подсчетами	62
8. Выводы	69
НИЧИПОРОВИЧ А. А. Исследование быстротока Эриванской гидростанции.	
Предисловие	70
1. Введение	—
2. Описание Эриванской гидростанции	71
3. Исследование быстротока	83
4. Обработка полевых материалов	87
5. Исследование деревянного быстротока в Венской лаборатории водного и лесного хозяйств	93
6. Исследование быстротоков на установке Бойс	102

7. Исследование быстотоков Боровенского, Бакурцикского и др.	103
8. Выводы из исследований	104
З а к л ю ч е н и е	114

НИЧИПОРОВИЧ А. А. Испытание турбин и регуляторов Боз-Суйской гидростанции.

Предисловие	115
1. Введение	116
2. Гидростанция на арыке Боз-Су близ Ташкента	—
3. Испытание турбин	139
4. Испытание регуляторов.	158

Предисловие (к статьям проф. Щапова)	167
--	-----

Проф. ЩАПОВ Н. М. I. Исследование Ленинанканской гидростанции.

1. Введение	168
2. Ленинанканская гидростанция им. С. К. Орджоникидзе	—
3. Испытания 1928 г.	177
4. Испытания 1929 г. и замеры расхода	179
5. Вычисление расходов	185
6. К. п. д. турбин по вычислениям на месте	189
7. К. п. д. турбин по дополнительным вычислениям	192
8. Сопротивление трубопровода	—
9. Опустение (кавитация)	195
10. Борьба с шугой	197

II. Исследование Милятинской гидростанции.

1. Общие сведения	198
2. Гидростанция	199
3. Испытания	201
4. Число оборотов турбины	202
5. Выводы	204

50

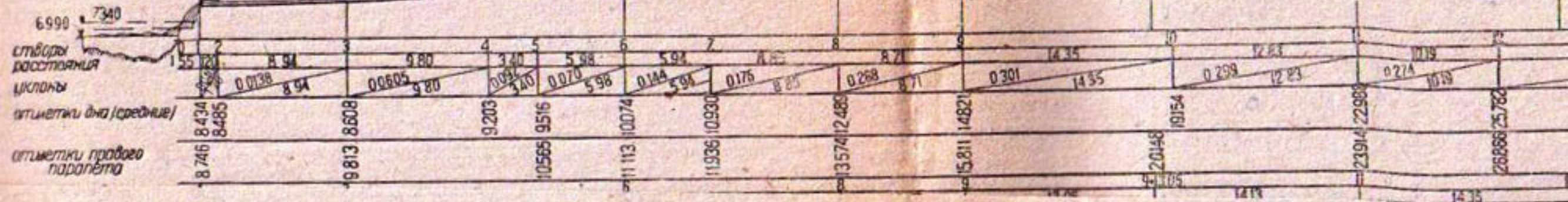
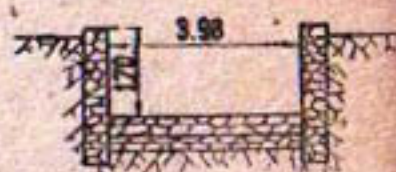
40

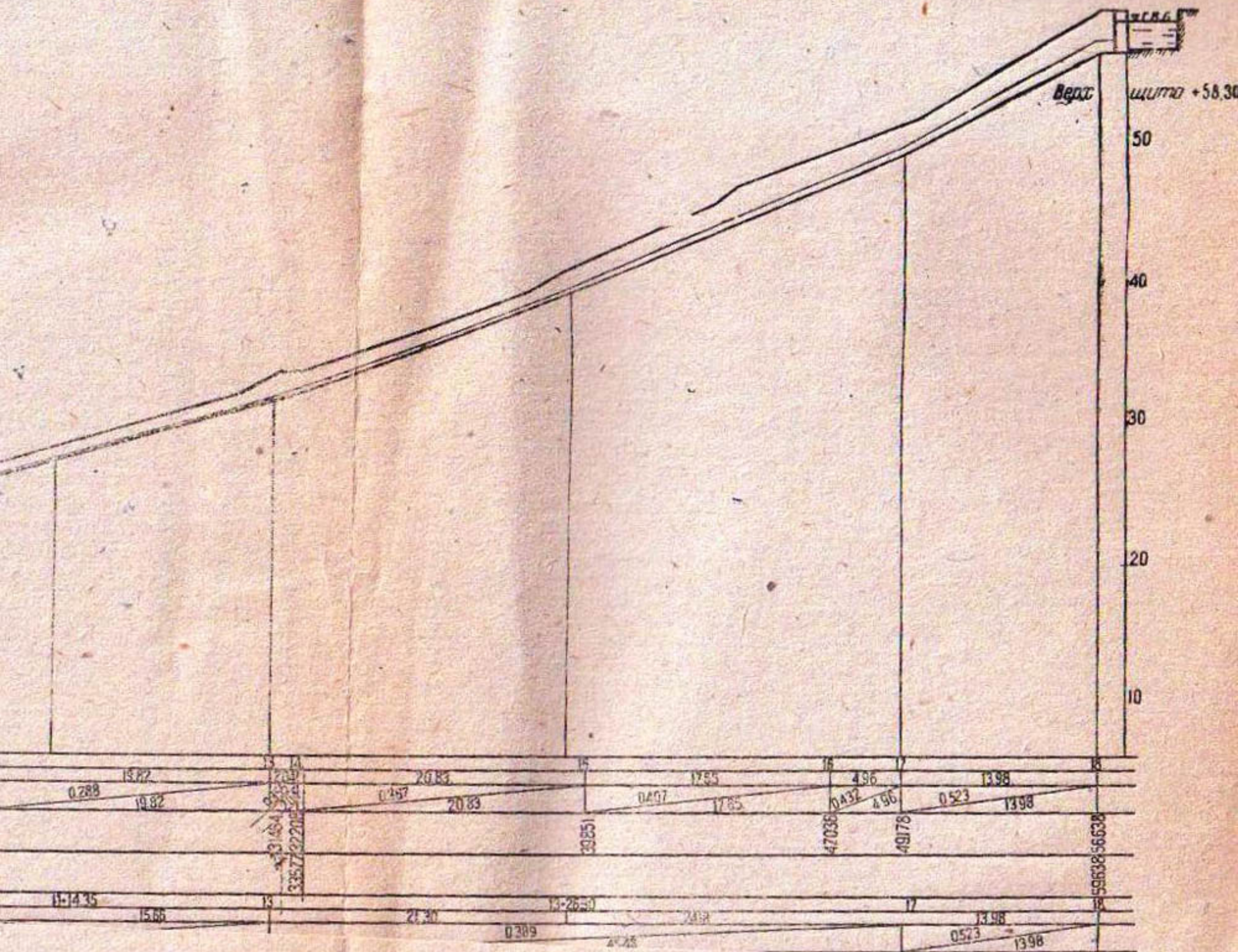
30

20

10

Поперечный разрез по створу № 15





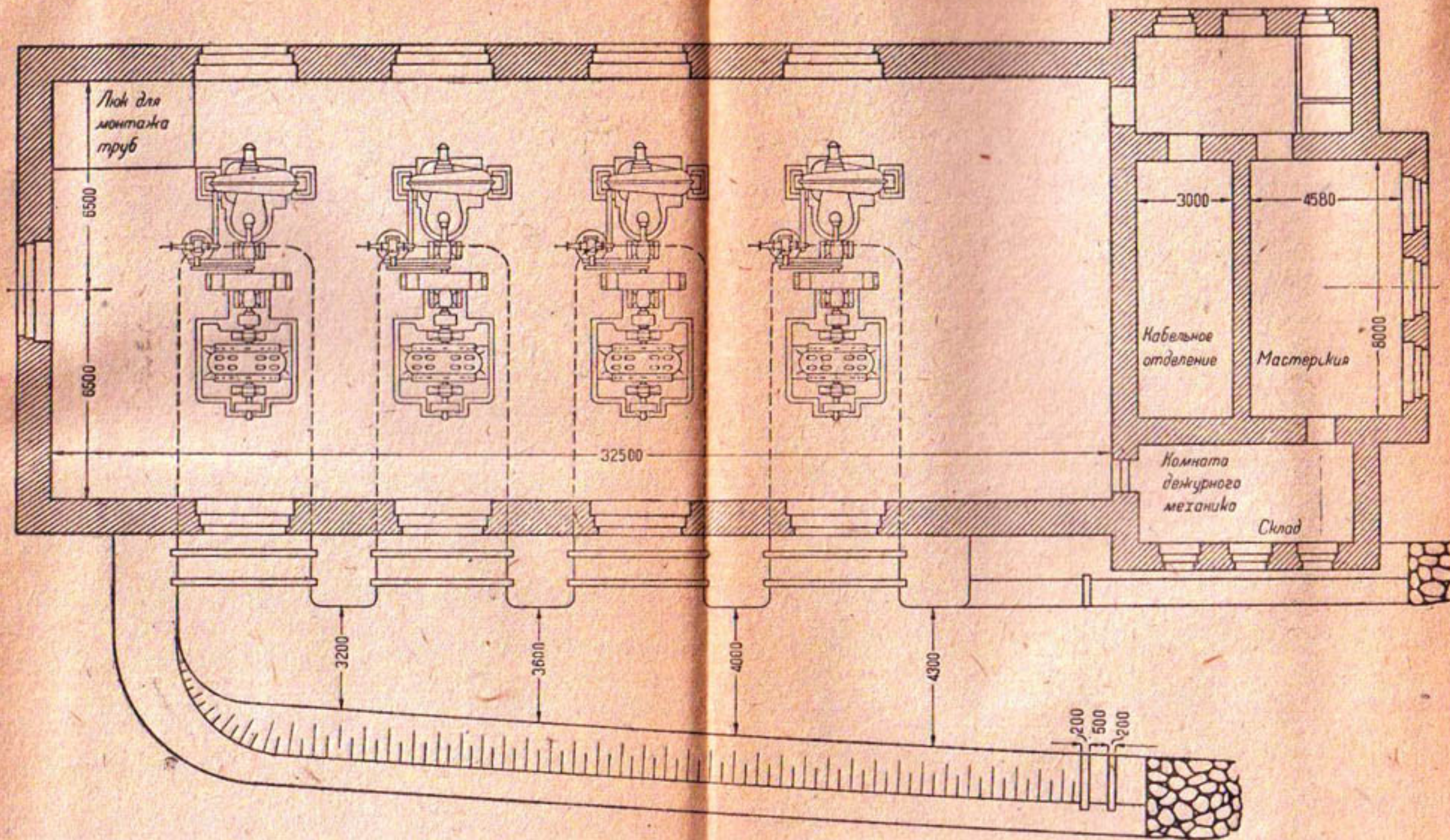


Рис. 18. План машинного вала.

