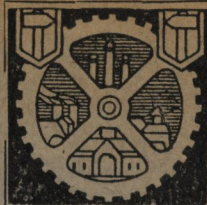




ИНЖЕНЕРНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ
БИБЛИОТЕКА.



ШОКЛИТШ, А., докт.-инж.

ГРАФИЧЕСКАЯ ГИДРАВЛИКА.



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО.

Москва — 1927 г.

Государственное Техническое Издательство.

МОСКВА, Центр, Ильинка, Юшков пер., д. 6. Телеф. 2-56-34.

Инженерно-Промышленная библиотека.

- Александров, В. А.**, проф. Электрическое оборудование современных автомобилей и мотоциклов. М. 1923 г. 192 стр. 197 рис. Ц. 2 р. 20 к.
- Баркгаузен, Г.**, проф. Катодные лампы. Перевод с нем. под ред. проф. М. М. Глаголева. М. 1925 г. Изд. 2-е. 72 стр. 55 рис. Ц. 75 к.
- Берлов, М. Н.**, проф. Детали машин. Вып. II. Клепка балок и колонн. М. 1922 г. Изд. 4-е. 69 стр. 71 рис. Ц. 2 р. 50 к. Атлас на 15 табл. Ц. 1 р.
- Его же.** Детали машин. Сокращенное руководство по расчету и проектированию. Для технич. учебн. завед., техников и механиков. Расчеты с пояснительными примерами, с 283 рис. и 30 таблицами конструкт. чертежей в красках, в отдельном атласе. Ч. I. Текст. 352 стр. Ч. II. Атлас. М. 1927 г. Изд. 2-е. Ц. с атласом 6 р. 50 к.
- Его же.** Детали машин. Вып. IX. Подъемники. Руководство по расчету и проектированию деталей машин. Для студентов, техников, механиков и инженеров. Расчеты с пояснительными примерами, многочисл. фигур. и таблицами конструкт. чертежей (в отдельн. атласе). М. 1926 г. 208 стр., множество рисунков. Ц. с атласом 7 р. 50 к.
- Велихов, П. А.**, проф. Теория инженерных сооружений. Опыт слитного изложения основ сопротивления материалов и строительной механики. Вып. I. М. 1924 г. 304 стр. 200 рис. Ц. 3 р. 35 к.
- Ветцель, И.**, инж. Разработка проекта по электрическому освещению. Перев. с франц. инж. С. Г. Розенбаума. М. 1926 г. 40 стр. 38 рис. Ц. 60 к.
- Видмар, М.**, д-р техн. Экономические законы проектирования электрических машин. Под ред. проф. Я. Н. Шпильрейна. М. 1924 г. 110 стр. 7 рис. Ц. 1 р. 40 к.
- Гартман, О. Г.** Пар высокого давления. Пер. с нем. под ред. инж.-мех. Н. А. Доллежал. М. 1927 г. 76 стр. 65 рис. Ц. 1 р. 20 к.
- Гирш-Вилькинг.** Справочник по электротехнике. Для инженеров, техников и учащихся высших и средних технических учебных заведений. Пер. с 21-го нем. изд. инж. Т. А. Гинзбурга. Под ред. проф. В. А. Александрова. М. 1927 г. 232 стр. 56 рис. Ц. 2 р. 90 к. в папке.
- Дрюри, Г. Б.**, д-р. Научное управление. История и критика. Перевод с английского Е. Тимофеева под редакцией Д. Хлебникова. М. 1925 г. 88 стр. Ц. 50 к.
- Дуббель, Г.**, проф. Справочник по математике для инженеров, техников, студентов и преподавателей математики. Пер. Н. П. Тарасова под ред. и в перераб. проф. Н. Н. Лузина. М. 1927 г. 280 стр. 213 рис. Ц. 2 р. 85 к., в папке 3 р. 20 к.
- Жаксон, А.**, д-р инж. Современные деревянные конструкции в инженерных сооружениях. Под ред. и в обраб. проф. Н. К. Лахтина. М. 1926 г. Изд. 2-е. 76 стр. 130 рис. Ц. 1 р. 20 к.
- Живаго, В. И.**, инж. Курс начертательной геометрии. Для технич. учебн. заведений и для самостоят. изучения. М. 1927 г. 168 стр. 478 рис. в отд. атласе. Ц. с атлас. 3 р. 80 к. Науч.-Техн. Секц. Госуд. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов.
- Жуковский, Н. Е.**, проф. Теоретическая механика. Часть I. Статика и графостатика. М. 1927 г. Изд. 9-е. 159 стр. 193 рис. Ц. 2 р. 25 к.
- Его же.** Теоретическая механика. Часть II. Кинематика и динамика. М. 1927 г. Изд. 8-е. 176 стр. 159 рис. Ц. 2 р. 45 к.
- Его же.** Теоретическая механика. Часть III (дополнительные статьи). М. 1925 г. 44 стр. 49 рис. Ц. 60 к.
- Его же.** Теоретические основы воздухоплавания. Под редакц. инж.-мех. В. П. Ветчинкина и Н. Г. Ченцова. М. 1925 г. Изд. 2-е. 306 стр. 354 рис. Ц. 4 р. 65 к.
- Его же.** Заметки по вариационному исчислению. М. 1923 г. 20 стр. 12 рис. Ц. 10 к.
- Зейферт, Ф.**, инж. Термодинамика газов и паров. Пособие для инженеров и студентов. Под редакц. проф. А. Л. Королькова. М. 1926 г. 72 стр. 26 рис. Ц. 1 р. 30 к.
- Его же.** Конструкции и расчет паровых турбин. Руководство для техн. школ и практиков. Пер. с нем. с дополн. инж. Л. А. Боровича. М. 1926 г. 72 стр. 67 рис. Ц. 1 р. 10 к.
- Кашкаров, Н. А.**, проф. Графические таблицы для расчета железобетонных сооружений. М. 1926 г. Изд. 2-е. 64 стр. 28 табл. 10 рис. Ц. 1 р.
- Клейнлогель, А.**, инж. Формулы для расчета рамных конструкций. Перев. с немецк. под ред. проф. Н. А. Кашкарова. М. 1926 г. Изд. 2-е. 208 стр. Ц. 2 р.
- Его же.** Составление смет на железобетонные сооружения с детально-разработанными примерами из практики. Перев. и дополн. инж. Н. Н. Павлова. М. 1926 г. Изд. 2-е. 112 стр. 23 рис. Ц. 1 р. 70 к.
- Козак, Е.**, инж. Схемы включений электрических установок постоянного и переменного токов с описанием их действия. Перев. с нем. под ред. и в обраб. проф. В. А. Александрова. М. 1927 г. 100 стр. 226 рис. Ц. 1 р. 70 к.
- Броль, М.**, проф. Учебник электротехники для технич. школ и практиков. Под ред. проф. Б. И. Угрюмова. М. 1926 г. Изд. 5-е, дополн. 320 стр. 577 рис. Ц. 4 р. 50 к.

Медведева

Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

Б. Серия 4.

Инженерно-Промышленная Библиотека.

№ XIII—65.

ШОКЛИТШ, А., докт.-инж.

ГРАФИЧЕСКАЯ ГИДРАВЛИКА.

Перевод с немецкого Г. А. ВОЛЬПЕРТ.
Под редакцией проф. Н. Н. БУХГОЛЬЦ,

с 45 черт. в тексте.



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО.

Москва — 1927 г.

**Без разрешения Гостехиздата
перепечатка не допускается.**

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие автора	3
I. Вспомогательные методы графической гидравлики	4
1. Параллельные координаты	4
2. Суммарные кривые	8
3. Линия поворота	9
II. Средняя скорость в открытых руслах	9
III. Определение кривой подпора	13
1. Цилиндрическое русло	13
2. Неправильное русло	16
IV. Расчет каналов	17
1. Определение расхода, обуславливающего размеры канала	17
2. Расчет профиля канала	19
V. Определение наиболее выгодного диаметра трубы	22
VI. Расчет водопроводных труб	24
VII. Истечение из отверстий	26
VIII. Время опорожнения водоса неправильной формы	26
IX. Полный водослив	27
X. Колебание уровня в водоеме	28
XI. Расчет выравнивающих резервуаров	30
XII. Колебание уровня в напорных резервуарах	36
XIII. Обработка измерений скорости в реках и каналах	40
XIV. Обработка наблюдений над уровнем воды	43
1. Кривая частоты и кривая продолжительности	43
2. Связь между высотами уровня в различных сечениях	43
3. Кривая суммарного расхода	43
XV. Просачивание под плотинами	44
Добавление:	
1. Гидравлический радиус трапециевидных профилей	46
2. Прирост населения в обслуживаемой местности	47
3. Мощность силовой установки	48

Предисловие автора.

В инженерном обиходе все более и более находят себе применения графические методы вычислений. Все инженеры знакомы с графостатикой и графическими приемами расчета мостов и знают, насколько эти методы проще и нагляднее аналитических. Возражения, неоднократно высказывавшиеся против графического исчисления по поводу неточности получающихся результатов, совершенно неосновательны, так как при сколько-нибудь аккуратной работе точность получающихся результатов отнюдь не меньше, чем при пользовании счетной линейкой; последняя же достаточна почти для всех инженерных расчетов. И если графическое исчисление, несмотря на свои выгоды, находило себе до сих пор мало применения, то это всецело можно отнести за счет того, что ему уделялось мало внимания в математическом преподавании; вследствие этого приемы графического исчисления неизвестны или, в лучшем случае, непривычны для широких кругов и поэтому внушают к себе некоторое недоверие.

Впрочем, не следует и переоценивать значения графических методов. В опытных руках они быстро приводят к цели, но самое изучение их требует значительной затраты времени. В общем случае графические приемы вычислений можно рекомендовать только тогда, когда они могут заменить собою ряд повторных однообразных вычислений, благодаря чему окупается труд и время, потраченные на их изучение; исключение составляют номограммы — графически представленные формулы, которые, будучи раз начерчены, годятся для всех случаев и дают возможность без какой-либо подготовки непосредственно находить значения искомых величин.

Графическая гидравлика находится еще в периоде развития, и многие вопросы еще окончательно или даже совсем не разрешены. Настоящая работа является сборником графически разрешимых задач. Кроме ряда конструктивных приемов, в которых главным образом, применяется метод суммарной кривой, мною даны номограммы главнейших формул гидравлики. Чтобы дать читателю возможность, в случае надобности, построить самому подобные номограммы (с другими интервалами или в других масштабах), в начале книги изложены в краткой форме основные методы представления формул в параллельных координатах и, кроме того, для каждой из приведенных номограмм указан способ построения. Рекомендованные масштабы служат для построения номограмм на бумаге формата 21×34 см. Предполагается, что читатель знаком с основами гидравлики, и поэтому главное внимание обращено в сторону самих вычислений.

Будучи убежден, что графическая гидравлика является весьма существенной частью того научного материала, которым приходится работать инженеру-гидротехнику, я решился написать предлагаемую книгу, рассчитывая этим заполнить пробел, который получился в гидравлике вследствие недостаточного внимания к графическому исчислению. Надеюсь, что удовлетворю запросам своих коллег, тем более, что главное внимание мною обращено на те вопросы, которые наиболее часто встречаются в практике инженера.

1. Вспомогательные методы графической гидравлики.

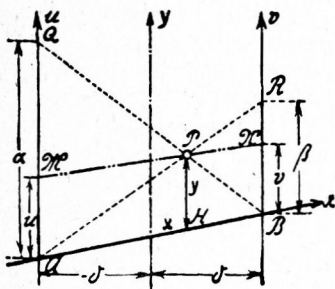
Графическая гидравлика для решения своих задач пользуется всеми методами графического исчисления. Наряду с изображением уравнений в Декартовых координатах, которое предполагается известным, чрезвычайно выгодно пользоваться параллельными координатами, а также методами графического исчисления бесконечно малых и, так называемой, линией поворота. Так как все эти методы еще незнакомы широкому кругу инженеров, необходимо предварительно дать краткие сведения о них в пределах, требуемых для дальнейшего изложения.

1. Параллельные координаты.

Номограммой в широком смысле этого слова называют графическое изображение какого-нибудь уравнения; однако, в последнее время этот термин применяется обыкновенно для изображений уравнений в параллельных координатах. В то время, как при помощи Декартовых координат наглядным образом могут быть представлены уравнения, содержащие не более трех переменных, — номограммы дают возможность весьма просто графически изображать уравнения с большим числом переменных и притом — в одной плоскости. Номография, онование которой положил d'Осагнп, дает простые приемы для построения номограмм, позволяющих во многих случаях

весьма просто производить подсчеты по формулам и вполне заменяющих громоздкие таблицы. Точность вычислений при неслишком мелких масштабах не меньше, чем при пользовании счетной линейкой.

В общем случае номограмма состоит из столькож прямолинейных или криволинейных шкал, сколько содержится в уравнении переменных. Значения переменных, удовлетворяющие уравнению, в номограмме всегда расположены на прямой, пересекающей шкалы в точках, соответствующих этим значениям переменных. В то время, как для Декартовых координат системой отсчета служат две пересекающиеся прямые, в номограммах такой системой являются две параллельные прямые, при чем начало координат заме-



Черт. 1.

няется прямой AB , называемой основанием (черт. 1). В параллельных координатах две координаты u и v определяют не точку, а прямую (MN на черт. 1); точка же (например, P) определяется двумя пересекающимися прямыми. При графическом изображении формул, встречающихся в гидравлике, большей частью приходится иметь дело с прямолинейными функциональными шкалами и только в редких случаях — с криволинейными.

Составим уравнение точки в параллельных координатах. Осями параллельной системы координат пусть будут параллельные лучи U и V , основанием — прямая AB . Прямые AK и BQ , проведенные через точку P , отсекают на параллельных коорди-

натных осях отрезки α и β . Проведя через точку P еще произвольную третью прямую MN , из подобия треугольников найдем:

$$v : (\alpha - u) = (\beta - v) : u \dots \dots \dots (1)$$

или
$$\frac{u}{\alpha} + \frac{v}{\beta} = 1 \dots \dots \dots (2)$$

Положив
$$\alpha = -\frac{C}{A} \text{ и } \beta = -\frac{C}{B} \dots \dots \dots (3), (4)$$

и подставив эти значения α и β в ур. (2), получим:

$$-\frac{Au}{C} - \frac{Bv}{C} = 1 \dots \dots \dots (5)$$

или
$$Au + Bv + C = 0 \dots \dots \dots (6)$$

Это уравнение называется нормальным уравнением точки; им мы всегда будем пользоваться в дальнейшем.

Возьмем теперь такую Декартову систему координат, чтобы ось X ее совпадала с основанием параллельной системы, а ось Y была параллельна ее осям и проходила через середину отрезка AB . Обозначив расстояние между параллельными осями через 2δ , из подобия треугольников, найдем:

$$\frac{AQ}{HP} = \frac{AB}{HB} \text{ или } \frac{x}{y} = \frac{2\delta}{\delta - x} \dots \dots \dots (7)$$

откуда
$$1 - \frac{x}{\delta} = \frac{2y}{\alpha} \dots \dots \dots (8)$$

Полагая как раньше $\alpha = -\frac{C}{A}$, получим окончательно:

$$\frac{x}{\delta} - \frac{2A}{C} y = 1 \dots \dots \dots (9)$$

Из подобия другой пары треугольников следует:

$$\frac{BR}{HP} = \frac{AB}{AH} \text{ или } \frac{\beta}{y} = \frac{2\delta}{\delta + x}, \dots \dots \dots (10)$$

откуда
$$1 + \frac{x}{\delta} = \frac{2y}{\beta} \dots \dots \dots (11)$$

Полагая опять $\beta = -\frac{C}{B}$, получим:

$$-\frac{x}{\delta} - \frac{2B}{C} y = 1 \dots \dots \dots (12)$$

Сложив равенства (9) и (12), определим y :

$$y = -\frac{C}{A+B} \dots \dots \dots (13)$$

наконец, подставив это значение y в рав. (9), найдем x :

$$x = -\delta \frac{A-B}{A+B} \dots \dots \dots (14)$$

В этих равенствах x и y суть координаты точки P относительно Декартовой системы координат, вышеуказанным способом совмещенной с параллельной системой.

В том случае, когда уравнение, которое требуется представить в виде номограммы, содержит более трех переменных, оно — посредством введения вспомогательных переменных — разлагается на ряд других уравнений таким образом, что каждое из новых уравнений содержит только три переменных (считая вместе с вспомога-

тельными) и, следовательно, имеет вид нормального уравнения (6). При помощи равенства (13) и (14) можно легко определить Декартовы координаты ряда точек шкалы третьего переменного, которые и наносятся на шкалу. В некоторых особых случаях уравнения с четырьмя переменными бывает выгодно изображать в виде одной номограммы; тогда для третьего переменного в общем случае получится семейство кривых, при чем каждая кривая будет соответствовать определенному значению четвертого переменного.

Когда уравнение со многими переменными введением вспомогательных переменных разбивается на ряд других, то номограммы этих уравнений чертятся так, чтобы шкалы вспомогательного переменного, общего двум уравнениям, совпадали. При пользовании такими номограммами не следует забывать, что на одной прямой лежат соответственные значения переменных только для одного уравнения (из вспомогательных). На приведенных ниже номограммах даны примеры числовых отсчетов, определяющих систему значений переменных, удовлетворяющих уравнению (так называемые «ключи»).

Выведем формулы, необходимые для построения номограмм некоторых типов уравнений, часто встречающихся в гидравлике.

Тип I. $f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2) + f_3(\alpha_3) = 0 \dots\dots\dots (15)$

Откладываем значения $f_1(\alpha_1)$ на оси U в масштабе μ_1 и значения $f_2(\alpha_2)$ на оси V в масштабе μ_2 . Тогда $u = \mu_1 f_1(\alpha_1)$ и $v = \mu_2 f_2(\alpha_2)$

и ур. (15) принимает вид: $\frac{u}{\mu_1} + \frac{v}{\mu_2} + f_3(\alpha_3) = 0 \dots\dots\dots (16)$

или $u \mu_2 + v \mu_1 + \mu_1 \mu_2 f_3(\alpha_3) = 0 \dots\dots\dots (17)$

Получили нормальное уравнение точки: $uA + vB + C = 0, \dots\dots\dots (6)$

при чем $A = \mu_2, B = \mu_1, C = \mu_1 \mu_2 f_3(\alpha_3)$.

Декартовыми координатами точек шкалы $f_3(\alpha_3)$ относительно Декартовой системы, совмещенной с параллельной, будут:

$$x = -\delta \frac{A-B}{A-B} + \delta \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} = \text{const.} \dots\dots\dots (18)$$

$$y = -\frac{C}{A-B} = -\frac{\mu_1 \mu_2 f_3(\alpha_3)}{\mu_1 + \mu_2} = -\mu_3 f_3(\alpha_3) \dots\dots\dots (19)$$

при чем масштаб для шкалы (α_3) определится из (19):

$$\mu_3 = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \dots\dots\dots (20)$$

Так как $x = \text{const.}$, то шкалой (α_3) будет прямая, параллельная шкалам U и V .

Чтобы указать направление этих трех шкал, уравнение (15) записывается так:

$$\begin{matrix} f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2) = -f_3(\alpha_3); \dots\dots\dots (21) \\ \uparrow \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \downarrow \end{matrix}$$

т.е. для положительных членов возрастание значений на шкалах идет, например, снизу вверх, а для отрицательных — сверху вниз.

Тип II. $f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2) f_3(\alpha_3) = 0 \dots\dots\dots (22)$

Значение $f_1(\alpha_1)$ опять откладывается на оси U , $f_2(\alpha_2)$ — на оси V , так что

$$u = \mu_1 f_1(\alpha_1) \text{ и } v = \mu_2 f_2(\alpha_2),$$

и уравнение (22) принимает вид: $\frac{u}{\mu_1} + \frac{v}{\mu_2} f_3(\alpha_3) = 0 \dots\dots\dots (23)$

или $u \mu_2 + v \mu_1 f_3(\alpha_3) = 0 \dots\dots\dots (24)$

Сравнивая его с нормальным уравнением точки

$$uA + vB + C = 0, \dots \dots \dots (6)$$

находим, что $A = \mu_2, B = \mu_1 f_3(\alpha_3), C = 0$.

Декартовыми координатами точек шкалы α_3 относительно Декартовой системы, совмещенной с параллельной, будут:

$$x = -\delta \frac{A-B}{A+B} = \delta \frac{\mu_1 f_3(\alpha_3) - \mu_2}{\mu_1 f_3(\alpha_3) + \mu_2}, \dots \dots \dots (25)$$

$$y = -\frac{C}{A+B} = 0; \dots \dots \dots (26)$$

следовательно, точки шкалы α_3 лежат на основании параллельной системы координат. Номограмма имеет вид буквы „z“, и деления шкалы α_3 , как легко видеть, наносятся проективным способом.

Тип III. $f_1(\alpha_1) f_3(\alpha_3) + f_2(\alpha_2) \varphi_3(\alpha_3) + \psi_3(\alpha_3) = 0 \dots \dots \dots (27)$

Значения $f_1(\alpha_1)$ наносим на ось U , значения $f_2(\alpha_2)$ — на ось V , так что

$$u = \mu_1 f_1(\alpha_1) \text{ и } v = \mu_2 f_2(\alpha_2).$$

Определи отсюда $f_1(\alpha_1)$ и $f_2(\alpha_2)$ и подставив их значения в ур. (27), приведем его к виду:

$$\frac{u}{\mu_1} f_3(\alpha_3) + \frac{v}{\mu_2} \varphi_3(\alpha_3) + \psi_3(\alpha_3) = 0 \dots \dots \dots (28)$$

или $u\mu_2 f_3(\alpha_3) + v\mu_1 \varphi_3(\alpha_3) + \mu_1 \mu_2 \psi_3(\alpha_3) = 0, \dots \dots \dots (29)$

т.е. к нормальному уравнению точки $uA + vB + C = 0, \dots \dots \dots (6)$

при чем $A = \mu_2 f_3(\alpha_3), B = \mu_1 \psi_3(\alpha_3), C = \mu_1 \mu_2 \psi_3(\alpha_3)$.

Декартовыми координатами точек шкалы α_3 будут:

$$x = -\delta \frac{A-B}{A+B} = -\delta \frac{\mu_2 f_3(\alpha_3) - \mu_1 \psi_3(\alpha_3)}{\mu_2 f_3(\alpha_3) + \mu_1 \psi_3(\alpha_3)} \dots \dots \dots (30)$$

$$y = -\frac{C}{A+B} = -\frac{\mu_1 \mu_2 \psi_3(\alpha_3)}{\mu_2 f_3(\alpha_3) + \mu_1 \psi_3(\alpha_3)} \dots \dots \dots (31)$$

В этом случае шкалой α_3 будет кривая линия.

Тип IV. $f_1(\alpha_1) f_2(\alpha_2) + \psi_2(\alpha_2) = \alpha' \dots \dots \dots (32)$

Значения α' наносим на ось U ; значения $f_1(\alpha_1)$ — на ось V_1 , так что

$$u = \mu' \alpha' \text{ и } v = -\mu_1 f_1(\alpha_1);$$

Подставляем значения α' и $f_1(\alpha_1)$ в ур. (32):

$$-\frac{v}{\mu_1} f_2(\alpha_2) + \psi_2(\alpha_2) = \frac{u}{\mu_1} \dots \dots \dots (33)$$

или $u\mu_1 + v\mu' f_2(\alpha_2) - \mu_1 \mu' \psi_2(\alpha_2) = 0, \dots \dots \dots (34)$

Сравнивая последнее уравнение с нормальным уравнением точки (6), находим:

$$A = \mu_1, B = \mu' f_2(\alpha_2), C = \mu_1 \mu' \psi_2(\alpha_2).$$

Декартовыми координатами точек шкалы α_3 будут:

$$x = -\delta \frac{A-B}{A+B} = \delta \frac{\mu' f_2(\alpha_2) - \mu_1}{\mu' f_2(\alpha_2) + \mu_1}, \dots \dots \dots (35)$$

$$y = -\frac{C}{A+B} = \frac{\mu_1 \mu' \psi_2(\alpha_2)}{\mu' f_2(\alpha_2) + \mu_1} \dots \dots \dots (36)$$

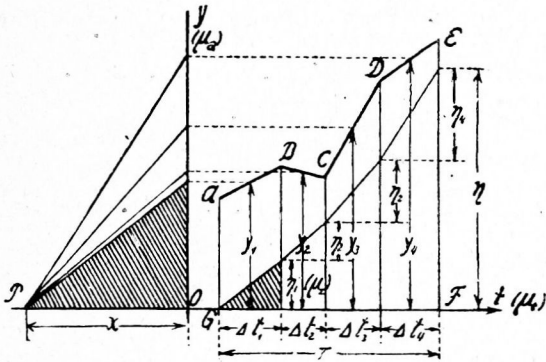
И в этом случае шкалой α_3 будет кривая линия.

2. Суммарные кривые.

Если при решении гидравлических задач требуется графически изобразить в виде кривой изменение какой-нибудь величины (обыкновенно расхода жидкости), то часто бывает выгодно вместо самой величины изображать изменение суммы ее значений, начиная с некоторого определенного момента времени. Кривая, изображающая изменения суммы, называется суммарной кривой и представляет собой не что иное, как интегральную кривую, соответствующую кривой, которая изображает изменение самой величины; она может быть построена по правилам графического исчисления бесконечно-малых.

Суммарные кривые, встречающиеся в гидравлике, обыкновенно имеют абсциссами — время, ординатами — расход жидкости¹⁾. Суммарной кривой постоянного расхода будет прямая, наклоненная под некоторым углом к оси абсцисс. Прямая, соединяющая две точки какой-нибудь суммарной кривой, представляет собою тоже суммарную кривую; но для среднего арифметического значений изменяющейся величины, за промежуток времени, соответствующий разности абсцисс взятых точек.

Покажем на примере, как можно построить суммарную кривую. Пусть требуется найти суммарную кривую для расхода жидкости, изменение которого изображено на черт. 2 ломаной линией *ABCDE*. Делим для этого площадь *F*, заключенную между ломаной *ABCDE* и осью абсцисс, прямыми, параллельными оси *Y*, на ряд трапеций с площадями f_1, f_2, f_3, \dots , определяем средние высоты y_1, y_2, y_3, \dots , проектируем их на *OY* и соединяем концы этих проекций лучами с полюсом *P*, расположенным на оси абсцисс на расстоянии x от начала координат. Эти лучи дают направления отдельных элементов суммарной кривой; на самом деле:



Черт. 2.

$x : \Delta t_1 = y_1 : \eta_1 \dots (37)$
и $\eta_1 = \frac{\Delta t \cdot y_1}{x} = \frac{f_1}{x} \dots (38)$

Конечная ордината имеет величину

$$\eta = \frac{\Sigma f}{x} = \frac{F}{x} \dots (39)$$

Итак, чтобы найти искомую сумму, надо ординату суммарной кривой измерить в масштабе y и умножить на полярное расстояние x . Если полярное расстояние сделать равным T , т.е. сделать равным базису площади *ABCDEF*, тогда конечная ордината суммарной кривой даст среднюю высоту площади *ABCDEF*. Умножения ординат на полярное расстояние можно избежать, если ординаты суммарной кривой измерять не в масштабе y , а в собственном, который можно определить на основании следующих соображений. Если ординаты y полигона *ABCDE* отложены в масштабе $1 \text{ м}^3 \text{сек}^{-1} = \mu_Q \text{ мм}$, абсциссы Δt в масштабе $1'' = \mu_t \text{ мм}$, ординаты суммарной кривой, дающие непосредственно суммы, в масштабе $1 \text{ м}^3 = \mu_\Sigma \text{ мм}$, то при полярном расстоянии в $x \text{ мм}$ имеет место следующая пропорция:

$$y \cdot \mu_Q : \eta \cdot \mu_\Sigma = x : \Delta t \cdot \mu_t \dots (40)$$

откуда

$$\mu_\Sigma = \frac{y \cdot \mu_Q \cdot \Delta t \cdot \mu_t}{\eta x} \dots (41)$$

¹⁾ Эти кривые представляют собою график объема вытекшей жидкости за промежуток времени, считая от начального. (Прим. ред.).

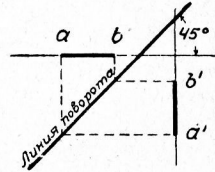
Так как мы хотим, чтобы $\Delta t \cdot y = \eta$, то за масштаб ординат суммарной кривой следует взять

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_1}{x} \dots \dots \dots (42)$$

Так как полярное расстояние x произвольно, то мы можем, давая ему соответствующее значение, подобрать желательный масштаб для μ_{Σ} .

3. Линия поворота.

При выполнении графических вычислений часто случается, что при построении какая-нибудь из величин, которой приходится пользоваться в дальнейшем, оказывается неудобно расположенной; в таких случаях можно, пользуясь так называемой линией поворота, дать этой величине, например, отрезку ab (черт. 3), более удобное положение $a'b'$. Если направление линии поворота делит угол между направлениями ab и $a'b'$ (большой частью этот угол бывает равным 90°) пополам, то отрезок $a'b'$ получается равным отрезку ab ; в остальных случаях поворот отрезка влечет за собою изменение его длины, а следовательно и изменение масштаба.



Черт. 3.

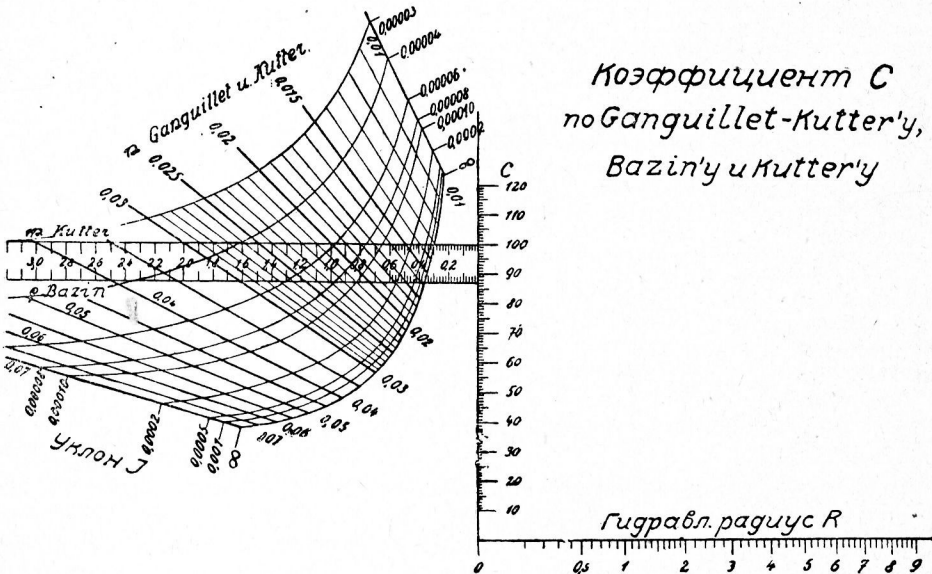
Литература.

- К § 1. M. d'Ocagne, Traite de Nomographie, Paris, № 1, 1921. — М. v. Pirani, Grafische Darstellung in Wissenschaft und Technik. Sammlung Göschen, Bd. 728.
- К § 2. C. Runge, Grafische Methoden, Samml. math-phys. Lehrbücher Bd. 18, стр. 96.

II. Средняя скорость в открытых руслах.

Для определения средней скорости U по уклону свободной поверхности потока I и гидравлическому радиусу R чаще всего пользуются одночленными формулами типа

$$U = c I^{\lambda} R^{\nu} \dots \dots \dots (43)$$



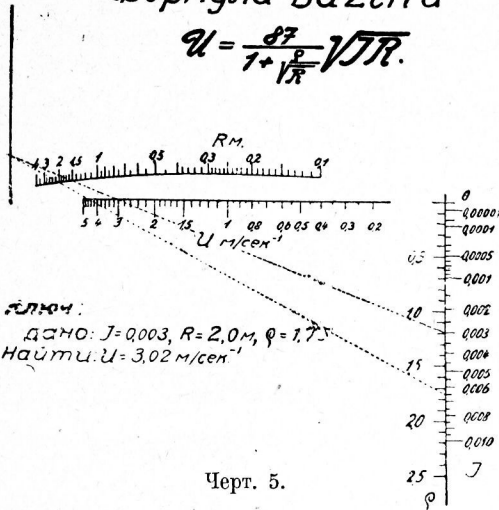
Коэффициент C
по Ganguillet-Kutter'у,
Bazin'у и Kutter'у

Черт. 4.

Положив $\lambda = \nu = 0,5$, получим известное уравнение de-Chezy, в котором коэффициент c , зависящий от свойств стенок (дна русла) и размеров его поперечного сечения, большую часть вычисляется по одной из следующих трех формул:

Формула Bazin'a

$$U = \frac{87}{1 + \frac{\rho}{\sqrt{R}}} \sqrt{JR}$$



Черт. 5.

$$c = \frac{87}{1 + \frac{\rho}{\sqrt{R}}} \dots (44)$$

(Bazin'a)

$$c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00115}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0,0015}{I}\right)^{\frac{n}{\sqrt{R}}}} \dots (45)$$

(Ganguillet-Kutter'a)

$$c = \frac{100}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \dots (46)$$

(Kutter'a)

Ряд значений коэффициентов шероховатости ρ , n и m , определенных опытным путем, помещен в нижеследующей таблице:

Материал стенок и дна русла	Коэффициенты шероховатости по		
	Bazin'y ρ	Kutter'y m	Ganguillet-Kutter'y n
Струганные доски, цементная штукатурка, клинкерный кирпич	0,06	0,15	0,011
Хорошо прифугованные доски	—	0,20	—
Длинные железобетонные трубы	—	0,20	—
Обыкновенные доски	0,16	0,25	0,012
Тесовая или хорошая кирпичная кладка	0,16	0,25	0,013
Старые цементные каналы	—	0,30	—
Прокатные узкие железные трубы	—	0,30	—
Обыкновенная кирпичная кладка, бревенчатые стенки	—	0,35	—
Бутовая кладка на известковом растворе, бетон	—	0,45	—
Бутовая кладка	0,46	0,55	0,017
Бутовая кладка с илистой подошвой	—	0,75	—
Старая каменная кладка с илистой подошвой, гладкие скалистые стенки	—	1,00	—
Земляные каналы с очень правильными стенками и без растительности	0,85	1,50	—
Бетон старый	—	—	0,020
Земляные каналы старые	1,30	1,75	0,025
Земляные каналы старые с камнями и водорослями	1,75	2,00	0,030
Дренажные каналы, негладкие скалистые стенки	—	—	0,030
Горные реки	до 3,50	—	0,080

Чтобы вычислить по формуле (43) среднюю скорость, предварительно определяют значение c по одной из формул (44)–(46), пользуясь для этого чертежом 4, а затем уже по номограмме 6 находят значение средней скорости U . Чертежом 4 можно также пользоваться для перевода друг в друга коэффициентов шероховатости ρ , m и n .

На черт. 5 в отдельности дана номограмма уравнения de Chezy с коэффициентом c по Bazin'у:

$$U = \frac{87 R}{\sqrt{R + \rho}} \sqrt{I} \dots \dots \dots (47)$$

Тщательные исследования над течением воды в деривационных каналах больших размеров привели Ph. Forchheimer'a ¹⁾ к формуле:

$$U = \frac{1}{n} I^{0,5} R^{0,7}, \dots \dots \dots (48)$$

где для n берутся значения шероховатости по Ganguillet-Kutter'у.

Из большого количества формул для естественных русел наиболее употребительны формула I. Негманек'a:

$$U = 30,7 I^{0,5} H \quad \text{при } H < 1,5 \text{ м}, \dots \dots \dots (49)$$

$$U = 34 I^{0,5} H^{0,75} \quad \text{при } 1,5 < H < 6 \text{ м}, \dots \dots \dots (50)$$

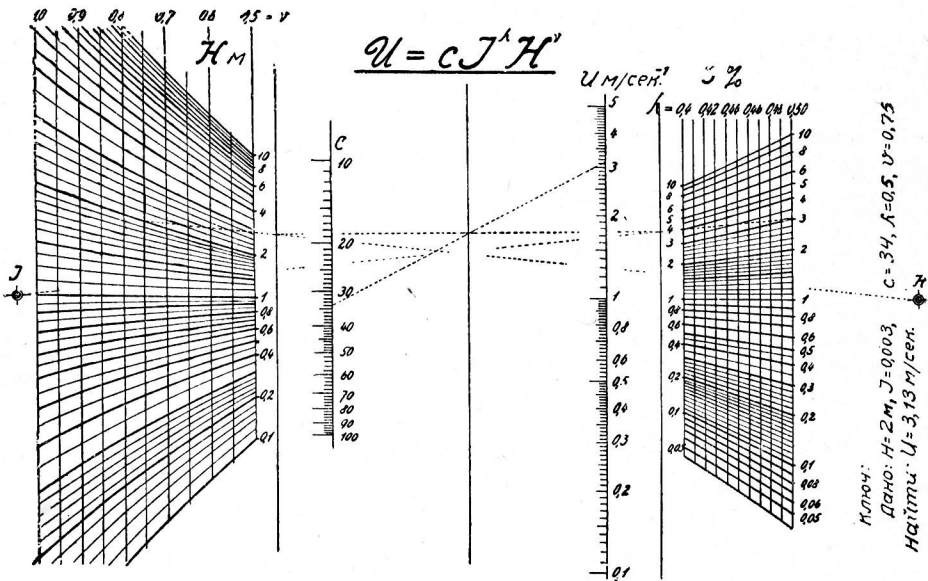
$$U = 44,5 I^{0,5} H^{0,6} \quad \text{при } H > 6 \text{ м} \dots \dots \dots (51)$$

и формула O. Gröger'a:

$$U = 23,78 I^{0,458} H^{0,766} \quad \text{при } 0,20 < H < 2,0 \text{ м}, \dots \dots \dots (52)$$

$$U = 22,11 I^{0,43} H^{0,58} \quad \text{при } H > 2,0 \text{ м}, \dots \dots \dots (53)$$

Они могут быть вычислены также при помощи номограммы 6.



Черт. 6.

Построение номограммы уравнения $U = c I^\lambda H^\nu$.

Вводя вспомогательное переменное α , получаем два уравнения: $U = c \alpha$ и $\alpha = I^\lambda H^\nu$; логарифмуя их, имеем

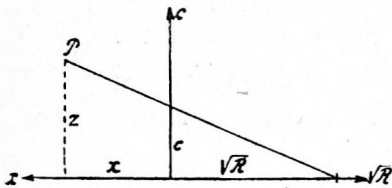
$$\log U - \log c - \log \alpha = 0, \dots \dots \dots (\text{тип I})$$

$$\lambda \log I + \nu \log H - \log \alpha = 0. \dots \dots \dots (\text{тип I})$$

¹⁾ Ph. Forchheimer, Der Durchfluss des Wassers durch Röhren und Gräben, insbesondere durch Werksgräben grosser Abmessungen. Berlin, 1923.

Каждому из этих уравнений соответствует по три шкалы. Шкала α для номограмм обоих уравнений делается общей, при чем деления на ней не наносятся (такие шкалы называются «немые»). Положив $\rho_I = 10$ см и $\rho_H = 10$ см, наносим значения $\nu \log H$ и $\lambda \log I$ соответственно на шкалы H и I (на номограмме 6 эти шкалы тоже немые), а затем при помощи центральных проекций с полюсами в H и I проектируем их на шкалы, соответствующие взятым значениям λ и ν , и точки шкал λ и ν с равными значениями соединяем кривыми, в результате чего получаем два семейства кривых (черт. 6).

Чтобы вычислить по номограмме скорость U , находим в обоих семействах кривых точки, соответствующие рассматриваемым значениям ν , H и λ , I , соединяем их с полюсами H и I и отмечаем точки пересечения получившихся лучей с немыми шкалами H и I ; через эти точки проводим прямую, и точку ее пересечения с нею шкалой α в середине номограммы соединяем прямой с точкой шкалы c , соответствующей рассматриваемому значению c ; эта последняя прямая и пересечет шкалу U в точке, соответствующей искомому значению скорости. Рекомендуемые масштабы при построении: 10 см для всех шкал.



Черт. 7.

Графическое вычисление c по формулам Ganguillet-Kutter'a, Bazin'a и Kutter'a.

Чтобы графически представить формулу Ganguillet-Kutter'a, положим в рав. (45)

$$\frac{1}{n} + 23 + \frac{0,00155}{I} = z \text{ и } n \left(23 + \frac{0,00155}{I} \right) = x;$$

тогда рав. (45) примет вид: $c = \frac{z \sqrt{R}}{\sqrt{R} + x}$,

а в таком виде его легко изобразить графически, руководствуясь схемой на черт. 7. Из подобия треугольников следует: $z:c = (x + \sqrt{R}):\sqrt{R}$, так что на самом деле

$$c = \frac{z \sqrt{R}}{\sqrt{R} + x}.$$

Эта схема показывает, как для определенных I и n можно построить соответствующую им точку P ; соединив эту точку прямой с точкой \sqrt{R} , отсечем на шкале c искомое значение. Все дело сводится лишь к тому, чтобы удобным образом сгруппировать точки P , соответствующие различным значениям I и n . Если в формуле (45) положим $R = 1$, получим: $c = \frac{1}{n}$, откуда следует, что в этом случае (при $R = 1$) c не зависит от уклона, и, значит, точки P для всех уклонов I при постоянном коэффициенте шероховатости n лежат на луче, проходящем через точки $c = \frac{1}{n}$ и $R = 1$. Для других значений R c зависит от уклона I ; придавая n ряд значений и вычисляя x для различных значений I откладываем эти значения x влево от шкалы c , проводим в полученных точках ординаты до пересечения с соответственными лучами n и таким образом, на каждом луче n получаем точки P для ряда значений уклона I . Наконец, точки на лучах n , соответствующие равным уклонам I , соединяем непрерывными кривыми (гиперболами, как не трудно убедиться).

Этой же схемой пользуются для графического вычисления коэффициентов c по Bazin'y и Kutter'y; только в этих случаях следует положить

$$z = \text{const} = 87 \text{ или } = 100; \quad x = \rho \text{ или } = m.$$

Прямые $z = 87$ и $z = 100$ проводятся параллельно шкале \sqrt{R} и на них откладываются значения коэффициентов ρ и m в масштабе шкалы \sqrt{R} .

Построение номограммы формулы Bazin'a (47).

Вводя вспомогательное переменное α , разлагаем уравнение (47) на два:

$$\frac{\rho}{R} + \frac{1}{\sqrt{R}} = \alpha, \quad (a) \text{ (тип IV)}$$

$$\frac{87\sqrt{I}}{U} = \alpha \quad (b) \text{ (тип IV)}$$

Шкала α для номограмм этих двух уравнений делается общей.

$$\text{Уравнение (a): } f_1(\alpha_1) = \rho, \quad f_2(\alpha_2) = \frac{1}{R}, \quad \psi_2(\alpha_2) = \frac{1}{\sqrt{R}},$$

$$\mu_a = 1 \text{ см}, \quad \mu_\rho = 4 \text{ см},$$

$$x = -\delta \frac{1-4R}{1+4R}, \quad y = \frac{4\sqrt{R}}{1+4R}.$$

R лежат на шкале, уравнением которой будет:

$$\frac{4\delta^2}{\mu_\rho \mu_a} y^2 + x^2 = \delta^2,$$

т.-е. на эллипсе с полуосями

$$\delta \quad \text{и} \quad \frac{\sqrt{\mu_\rho \mu_a}}{2}.$$

$$\text{Уравнение (b): } f_1(\alpha_1) = 87\sqrt{I}, \quad f_2(\alpha_2) = \frac{1}{U}, \quad \psi_2(\alpha_2) = 0,$$

$$\mu_I = 1 \text{ см}, \quad \mu_a = 1 \text{ см}, \quad x = \delta \frac{1-U}{1+U}, \quad y = 0,$$

т.-е. U лежат на прямолинейной шкале, которую совмещают с большой осью эллипса R . Из сравнения выражений для абсцисс шкал R и U следует, что под точками шкалы R на оси U лежат точки со значениями в 4 раза большими значений на шкале R .

Литература.

К уравн. (47): M. d'Ocagne, Ann. des Ponts et Chaussées (7) 8' (1898), стр. 307.

К уравн. (45): D. Banki, Energieumwandlungen. Berlin 1922. — Ph. Forchheimer, Hydraulik, Leipzig, 1914, стр. 551.

Другие способы вычислений: N. Napnowicz, Ztschr. der österr. Ing.-u. Arch.-Ver. 1913, — того же авт., Wykreslna tablica hydrauliczna, Lemberg, 1913. — Hygh. pressure hydraulic Pipe lines, каталог „M. W. Kellogg Company“, New-York, 90 Wets Street. — O. Gröger, Ztschr. der österr. Ing.-u. Arch.-Ver. 1914. — R. Weyrauch, Hydraulisches Rechnen, 4 Aufl. XI.

III. Определение кривой подпора.

1. Цилиндрическое русло.

а) **Графическое построение.** В цилиндрическом русле последовательные поперечные профили образуют части одной и той же фигуры. Проведем параллельно первоначальной свободной поверхности воды ряд плоскостей на равных расстояниях друг от друга обозначив их, напр., через Δh ; они пересекутся с продольным сечением по прямым, параллельным первоначальному продольному профилю свободной поверхности и отстоящим друг от друга на равных расстояниях положим Δh ; со свободной же

поверхностью запруженной воды эти плоскости пересекутся тоже по параллельным между собою прямым, но уже отстоящим друг от друга на разных расстояниях, напр., Δx (измеряемых по дну русла. Если постоянный уклон дна равен i , а переменный уклон свободной поверхности — I , то

$$\Delta h = i\Delta x - \Delta x(i - I) \dots \dots \dots (54)$$

или
$$\Delta x = \frac{\Delta h}{i - I} \dots \dots \dots (55)$$

Пренебрегая изменением живой силы движущейся воды в запруженной части, течение в отдельных участках можно считать приближенно равномерным; тогда для скорости U в этих участках можно положить:

$$U = c\sqrt{IR}, \dots \dots \dots (56)$$

откуда
$$I = \frac{U^2}{c^2R} \dots \dots \dots (57)$$

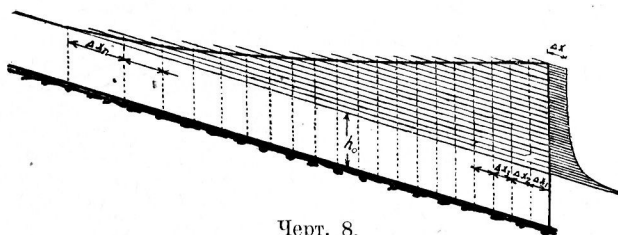
или, заменив U через $\frac{Q}{F}$, где Q и F обозначают соответственно расход воды и площадь поперечного сечения,

$$I = \frac{Q^2}{c^2RF^2} \dots \dots \dots (58)$$

Подставив это значение I в равенство (55), получим:

$$\Delta x = \Delta h \frac{1}{i - \frac{Q^2}{c^2RF^2}} \dots \dots \dots (59)$$

Взяв за Δh какую-нибудь часть высоты подпора у самой плотины, легко определим из рав. (59) расстояния Δx между вышеупомянутыми прямыми, а затем и кривую подпора. Чтобы избежать многократного повторения вычислений по форм. (59), можно вычислить Δx по этой формуле только для некоторых глубин, нанести



Черт. 8.

полученные значения Δx на чертеже, как это показано на черт. 8, и соединить концы отрезков непрерывной кривой, которая асимптотически приближается к первоначальной линии продольного профиля. Затем можно циркулем перенести все нужные для определения подпорной кривой значения Δx на левую часть чертежа 8. При этом следует заметить, что для вычисления всегда берутся значения c , R и F , соответствующие середине рассматриваемого участка русла, и поэтому за эти значения следует брать отрезки посередине между соответствующими значениями Δh (толстые линии с правой стороны черт. 8).

Указанным путем можно достаточно точно построить кривую подпора в виде ломаной линии.

б) **Определение с помощью номограммы.** Опять предполагаем движение воды в отдельных участках запруженной части равномерным и происходящим по закону:

$$U = cI^{\lambda} h^{\nu} \dots \dots \dots (60)$$

Измеряя x от плотины вверх по течению, будем иметь для уклона свободной поверхности:

$$I = i + \frac{dh}{dx}, \dots \dots \dots (61)$$

и расход воды на единицу ширины очень широкого естественного потока (для которого гидравлический радиус R можно без особой погрешности принять равным средней глубине) выразится равенством:

$$q = cI^{\lambda} h^{\nu+1} = c \left(i + \frac{dh}{dx} \right)^{\lambda} h^{\nu+1} \dots \dots \dots (62)$$

Далее, так как расход в каждом месте запруженной части должен равняться расходу в этом же месте до сооружения плотины при глубине h_0 и уклоне i , следует:

$$i dx = \frac{h^{\frac{\nu+1}{\lambda}}}{h^{\frac{\nu+1}{\lambda}} - h_0^{\frac{\nu+1}{\lambda}}} \cdot dh \dots \dots \dots (63)$$

или
$$\frac{ix}{h_0} = - \left[\frac{h}{h_0} - \frac{1}{\frac{\nu+1}{\lambda} - 1} \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{\nu+1}{\lambda} - 1} - \frac{1}{2^{\frac{\nu+1}{\lambda} - 1}} \left(\frac{h_0}{h} \right)^{2^{\frac{\nu+1}{\lambda} - 1}} + \dots \right] + C =$$

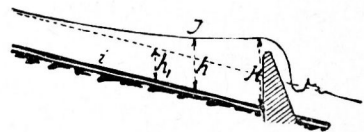
$$= -\Phi \left(\frac{h}{h_0} \right) + C \dots \dots \dots (64)$$

У плотины $x = 0$ и $h = H$, следовательно там имеет место равенство:

$$0 = -\Phi \left(\frac{H}{h_0} \right) + C, \dots \dots \dots (65)$$

и для длины подпора L , при глубине h в начале подпора и H — в конце подпора, имеем:

$$L = \frac{h_0}{i} \left[\Phi \left(\frac{H}{h_0} \right) - \Phi \left(\frac{h}{h_0} \right) \right] \dots \dots \dots (66)$$



Черт. 9.

В обычных случаях без особой погрешности можно принять $\lambda = 0,5$; значение же ν зависит от свойств русла: оно тем больше, чем больше шероховатость стенок русла.

По Негманек'у для рек, в которых

- $h < 1,5 \text{ м}, \dots \dots \dots \nu = 1,00$
- $1,5 < h < 6 \text{ м}, \dots \dots \dots \nu = 0,75$
- $h < 6 \text{ м}, \dots \dots \dots \nu = 0,60$

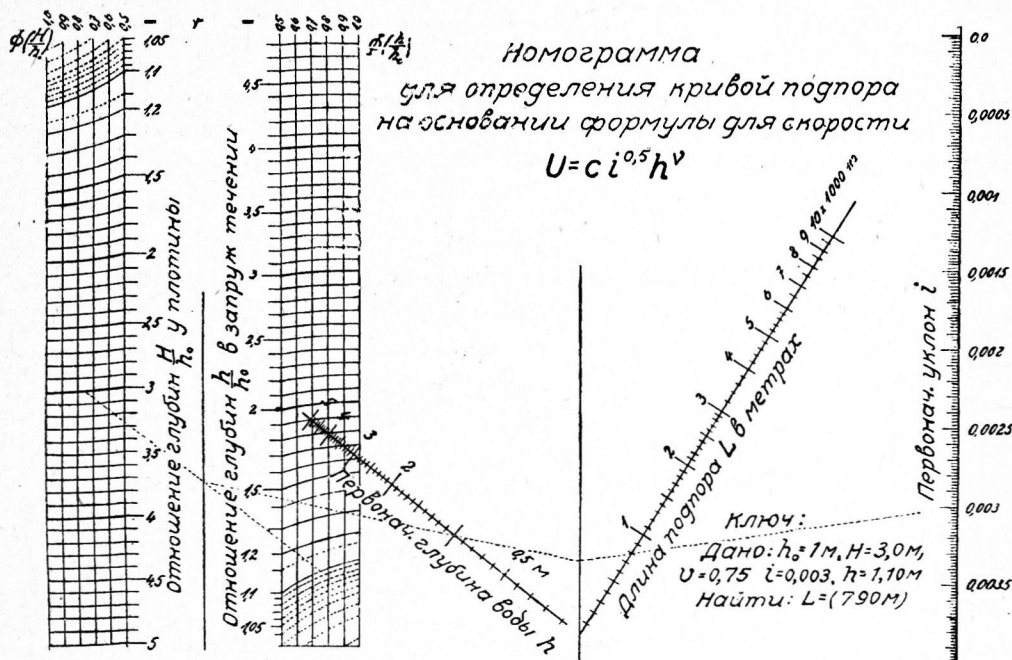
Шероховатость здесь дается как некоторая функция от глубины h , что вполне понятно: чем мелководнее река, тем большее влияние оказывает шероховатость стенок русла.

На черт. 10—12 дана номограмма для случая $\lambda = 0,5$ и $\nu = 0,5$ до 1,0, по которой, как видно из указанного примера, нетрудно найти длину подпора L .

Построение номограммы для определения кривой подпора. Вводя вспомогательные переменные α_1 и α_2 , разбиваем уравнение кривой подпора

$$L = \frac{h_0}{i} \left[\Phi \left(\frac{H}{h_0} \right) - \Phi \left(\frac{h}{h_0} \right) \right]$$

на три: $\Phi \left(\frac{H}{h_0} \right) - \Phi \left(\frac{h}{h_0} \right) = \alpha_1$ (тип I); $\alpha_1 h_0 = \alpha_2$ (тип II); $iL = \alpha_2$ тип II):



Черт. 10—12.

Соответствующие этим уравнениям частные номограммы располагаются согласно схеме на черт. 13. Чтобы номограммой можно было пользоваться для всех встречающихся значений v , функции Φ вычислены для значений $v = 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0$ и нанесены на соответствующие шкалы, симметричные относительно шкалы α_1 , причем деления на них соответствуют значениям отношений глубин $\frac{H}{h_0}$ и $\frac{h}{h_0}$, а не значениям функций, и точки с равными значениями соединены непрерывными кривыми. Для каждой такой пары шкал функций Φ с равным v следует брать одинаковые масштабы μ_{α_1} , так как они расположены симметрично относительно шкалы α_1 .

Масштабы, рекомендуемые при построении номограммы:

$$\mu_{\Phi} = 4 \text{ см, поэтому } \mu_{\alpha_1} = 2 \text{ см, } \mu_{\alpha_2} = 1 \text{ см; } \mu_i = 5000 \text{ см.}$$

2. Неправильное русло.

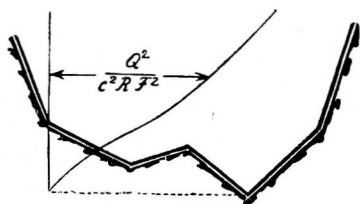
Если требуется определить кривую подпора для естественного потока с совершенно неправильным руслом, поступают так: разбивают запруженное течение реки (в направлении течения) поперечными сечениями на ряд коротких участков и для каждого из них применяют законы равномерного движения; зная расход Q и сред-

нее поперечное сечение каждого участка, можно определить среднюю скорость $U = \frac{Q}{F}$, а затем, пользуясь каким-нибудь законом для скорости, — например, уравнением de Chezy, — и уклон свободной поверхности рассматриваемого участка, а именно

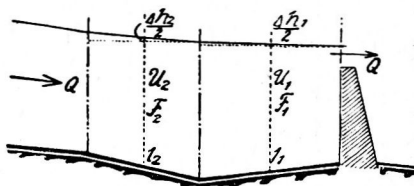
$$I = \frac{U^2}{c^2 R} = \frac{Q^2}{c^2 R F^2} = \frac{\Delta h}{l}, \dots \dots \dots (67)$$

а отсюда
$$\Delta h = I \cdot l = l \cdot \frac{Q^2}{c^2 R F^2} \dots \dots \dots (68)$$

Высота уровня воды у плотины большей частью дается заранее; определяем приближенную величину среднего поперечного сечения F — первого вверх по течению — и вычисляем повышение уровня Δh_1 , соответствующее длине участка запруженного течения l_1 (черт. 15).



Черт. 14.



Черт. 15.

Уровень в сечении F_1 выше уровня у плотины на $\frac{1}{2} \Delta h_1$.

Остается проверить это первое приближение и, в случае необходимости, улучшить. Затем продолжают аналогичные вычисления для следующих — вверх по реке — сечений. Итак, все сводится к вычислению величины дроби $\frac{Q^2}{c^2 R F^2}$ для различных сечений; удобнее всего это сделать, вычертив кривую зависимости этой дроби от размера принимаемых в расчет сечений $F_1, F_2 \dots$ (черт. 14).

Л и т е р а т у р а.

К а): Ph. Forchheimer, *Hydraulik*, Leipzig, 194, стр. 124.
 К б): там же, стр. 123.

IV. Расчет каналов.

1. Определение расхода, обуславливающего размеры канала.

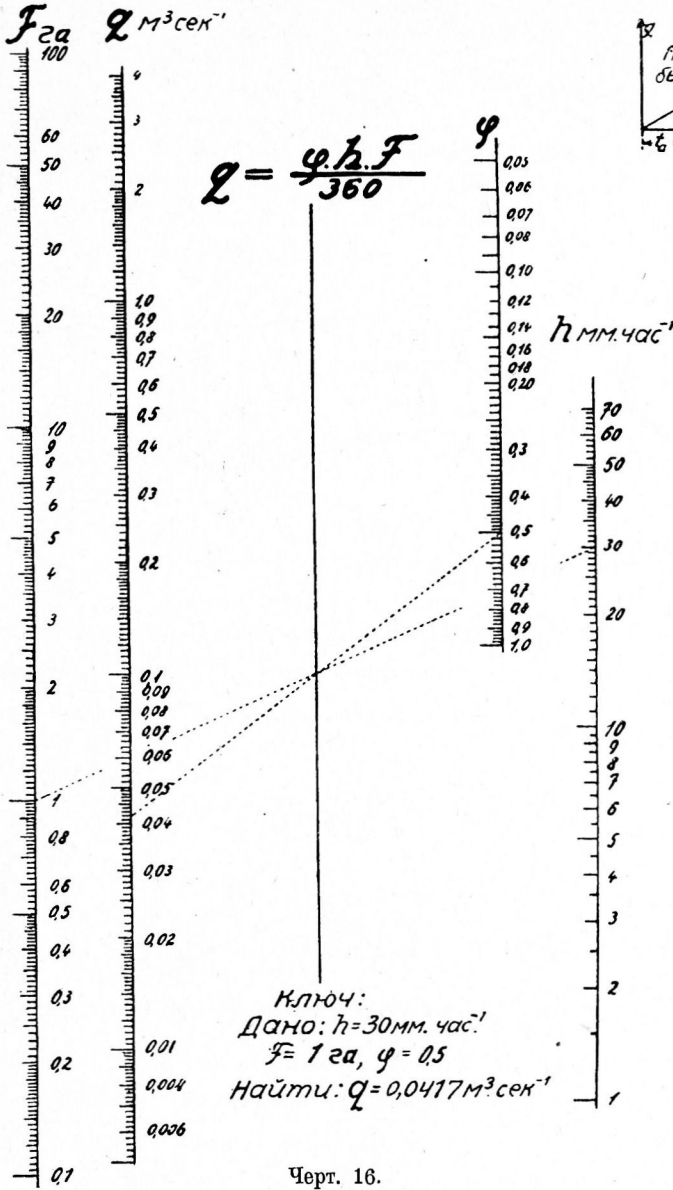
Если скорость воды в канале при полном его наполнении равна U , то частица воды пробегает расстояние L по длине канала в промежуток времени $t = \frac{L}{U}$ секунд. Пусть дождь продолжается t_r секунд, тогда через сечение канала в конце участка L (черт. 17) вода будет протекать в течение $T = t_r + \frac{L}{U}$ секунд.

Далее, если водосборная площадь равна F гектарам, интенсивность дождя — h мм в час, а коэффициент стока равен φ , то при продолжительном дожде через сечение в конце участка L в каждую секунду протекает

$$q = \frac{\varphi F h}{360} \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$$

воды. Эта формула легко высчитывается при помощи номограммы на черт. 17. При непродолжительном дожде, когда $t_r < \frac{L}{U}$, вода, поступившая в канал в начале его,

не успевают дойти до конца участка L , так как вследствие окончания дождя, воды в канал больше не поступает (черт. 18); в этом случае количество воды, протекающей через сечение в конце участка L , будет меньше, чем определяемое по фор-



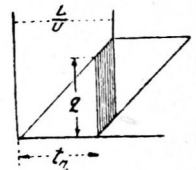
Черт. 16.



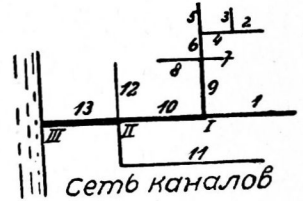
Черт. 17.

муле (70), и происходит так называемое замедление стока, которое, будучи принято в расчет при постройке длинных каналов, может до известной степени повлиять на размеры поперечного сечения.

Не трудно графически определить этот уменьшенный вследствие замедления стока наибольший расход для какой-нибудь системы каналов. Для примера возьмем



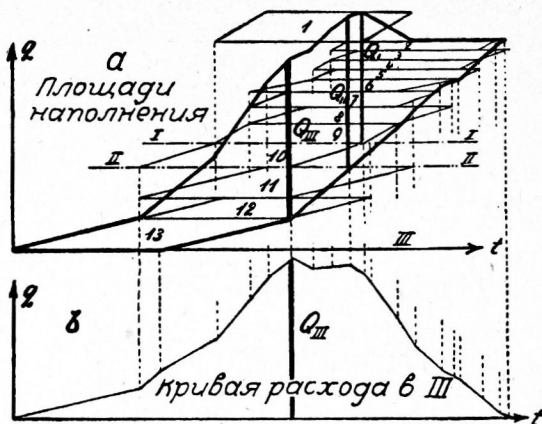
Черт. 18.



Черт. 19.

систему, изображенную на черт. 19. Зная интенсивность дождя, водосборную площадь и коэффициент стока, определяем при помощи номограммы 16 расход q , а затем — при помощи номограммы на черт. 21, 22, 23 — поперечное сечение канала и скорость воды в нем U при полном наполнении. Площади наполнения, соответствующие каждому отдельному каналу, легко вычерчиваются, как это ясно видно из черт. 20а; при этом следует заметить, что площади наполнения двух каналов, соединяющихся в узловой точке (напр. 9 и 12), имеют одну и ту же начальную абсциссу, так как эти оба канала начинают доставлять воду одновременно.

Простым преобразованием площадей из ряда полученных площадей наполнения, каждая из которых представляет из себя параллелограм, получаем фигуру, обведенную на черт. 20а жирной линией. Теперь уже не трудно определить наибольший расход для отдельных участков главного канала. Из черт. 20а легко усмотреть, что замедление стока принимается в расчет только на участке канала между узлами II и III. Наконец, если все площади наполнения сдвинуть вниз, к оси абсцисс,— для этого следует разности ординат точек, лежащих одна над другой на периметрах площадей наполнения на черт. 20а, перенести на черт. 20б, отложив их вверх от самой оси абсцисс,— получим в наглядной форме кривую расхода для узла III.



Черт. 20.

2. Расчет профиля канала.

Если уклон канала I и наибольший расход Q известны, размеры поперечного сечения канала легко рассчитать путем применения формулы Вазин'а для скорости. Учитывая осадки, всегда образующиеся во всех гладких каналах, коэффициент шероховатости ρ можно принять равным 0,3, безразлично, облицован ли канал цементом или клинкерным кирпичем. Тогда при площади поперечного сечения канала F и гидравлическом радиусе R расход равен

$$Q = \frac{87 F R}{\sqrt{R + \rho}} \sqrt{I} \dots \dots \dots (71)$$

Вычисление этой формулы легко производится по номограмме 23, позволяющей для ряда употребляемых профилей находить высоту профиля, если известны Q и I . На черт. 21 и 22 изображены наиболее употребительные профили, при чем для каждого из них дана кривая расхода, при вычерчивании которой расход при полном наполнении профиля принимался за единицу; при пользовании этими кривыми расходы при меньшей высоте воды получаются в долях расхода при полном наполнении.

Если высота профиля равна h , то площадь поперечного сечения равна $F = \alpha h^2$, периметр $P = \beta h$, гидравлический радиус при полном наполнении $R = \gamma h$; коэффициенты α , β и γ для 19 наиболее употребительных профилей даны в следующей таблице:

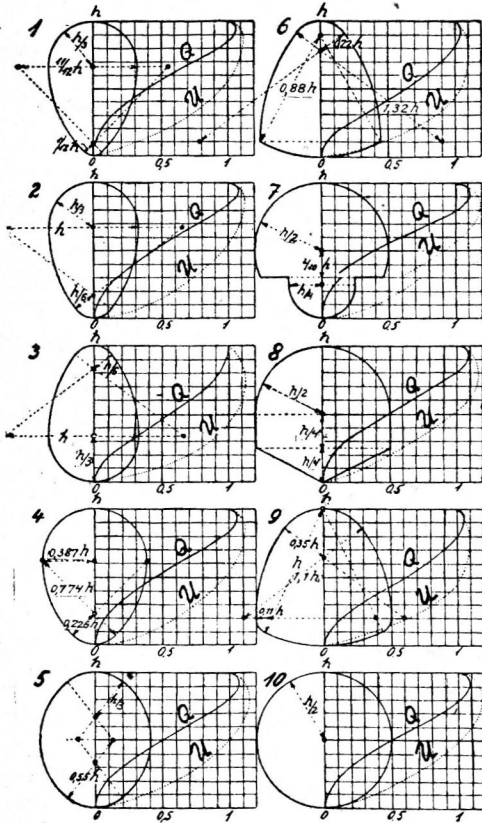
№ профиля	α	β	γ	№ профиля	α	β	γ
1	0,445	2,61	0,190	11	0,850	3,350	0,233
2	0,516	2,64	0,193	12	1,000	4,000	0,250
3	0,516	2,64	0,193	13	0,985	3,597	0,274
4	0,597	2,79	0,214	14	1,126	3,935	0,286
5	0,638	2,91	0,219	15	1,210	4,130	0,293
6	0,661	3,035	0,217	16	1,234	4,210	0,293
7	0,712	3,297	0,216	17	1,300	4,430	0,293
8	0,767	3,189	0,240	18	1,340	4,360	0,307
9	0,773	3,236	0,240	19	2,000	6,000	0,333
10	0,786	3,141	0,250				

Построение номограммы. Положив в ур. (71) $\frac{87 FR}{\sqrt{R+0,3}} = \varphi(h)$, где через h обозначена высота поперечного сечения, логарифмируя, получаем:

$$\frac{1}{2} \log I + \log \varphi(h) - \log Q = 0 \dots \dots \dots (\text{тип I})$$

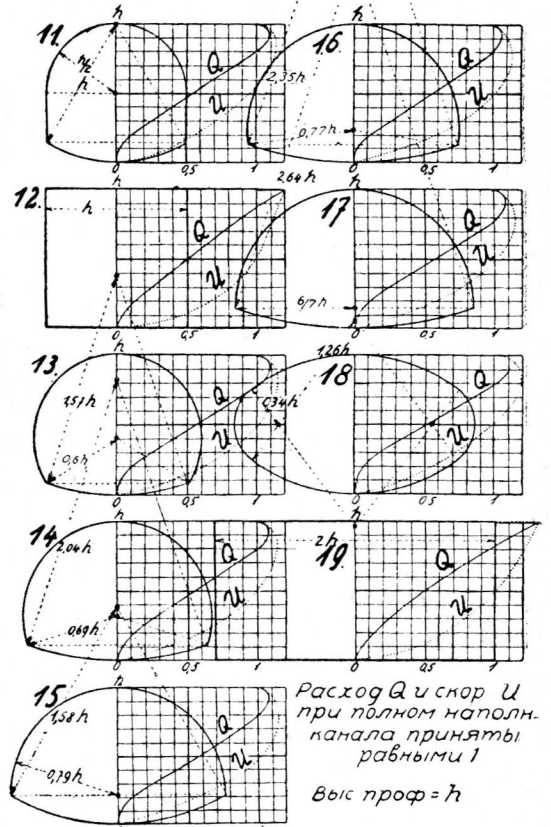
Значения $\frac{1}{2} \lg I$ наносим на шкалу v , значения $\varphi(h)$ — на шкалу u ; так как значения $\varphi(h)$ нам нужны только для построения номограммы, шкалу u делаем немой. Проведя прямую через соответственные точки шкалы Q и I , получим на

Профили каналов 1-10



Черт. 21.

Профили каналов 11-19



*Расход Q и скор U при полном наполн. канала приняты равными 1
Выс проф = h*

Черт. 22.

шкале $\varphi(h)$ точку; соединив эту точку прямой с полюсом с правой стороны номограммы, получим на шкале (слева от $\varphi(h)$), соответствующей выбранному профилю, искомую высоту поперечного сечения. Эта группа шкал слева от шкалы $\varphi(h)$ строится следующим путем: для каждого профиля (от 1 до 19) выясняем значения $\varphi(h)$ для ряда значений h и наносим на шкалу $\varphi(h)$. Проектируем полученные точки из полюса с правой стороны номограммы на соответствующие шкалы, отмечая на них значения высоты h . Точки всех шкал (19) с равными значениями h соединяем друг с другом непрерывными линиями. На черт. 23 расстояния шкал от полюса подобраны так, чтобы соединяющие линии были прямыми.

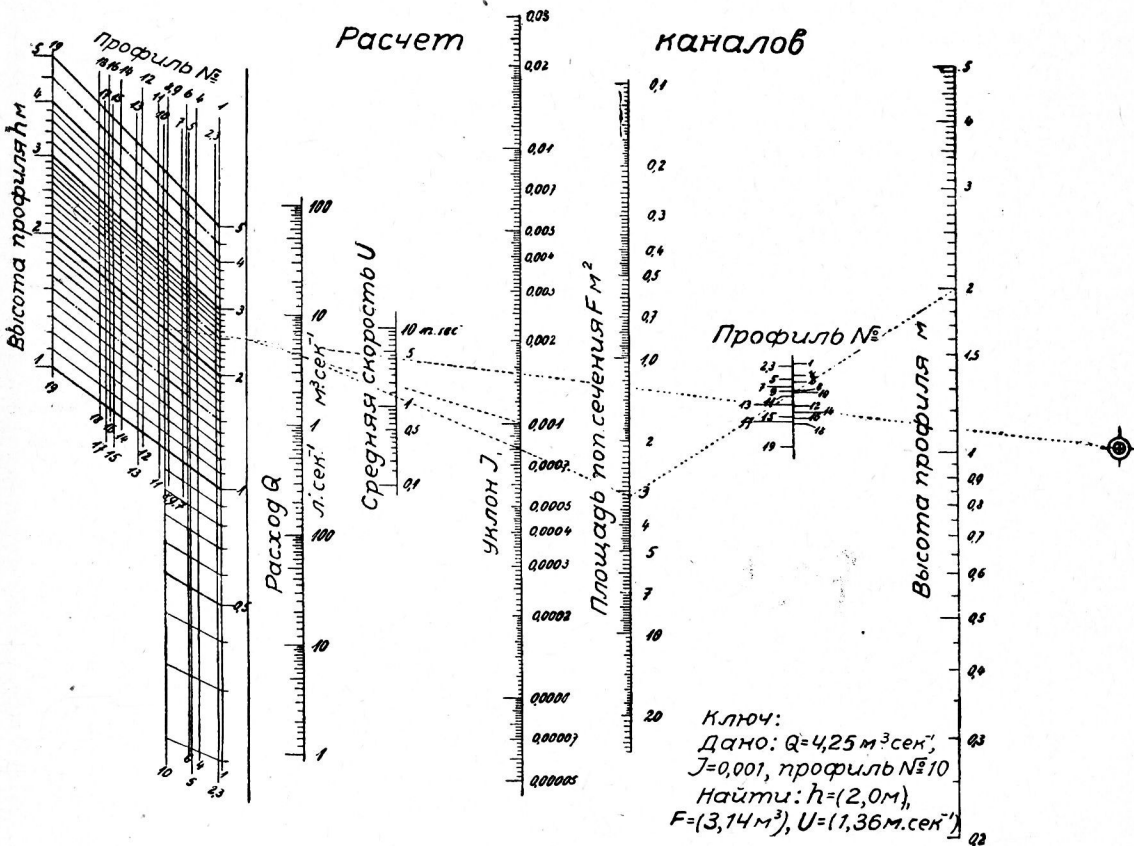
Площади всех поперечных сечений, как уже было сказано, выражаются формулой $F = \alpha h^2$; логарифмируя, получаем:

$$\log F - 2 \log h - \log \alpha = 0 \dots \dots \dots (\text{тип I})$$

Это уравнение представлено на правой половине черт. 23, причем и здесь на шкале α отмечены не значения α , а соответствующие номера профилей.

Для средней скорости в случае полного заполнения канала имеем: $U = \frac{Q}{F}$; логарифмируя, получаем:

$$\log U - \log Q + \log F = 0 \dots \dots \dots (\text{тип I})$$



Черт. 23.

При построении номограммы этого уравнения для Q и F пользуются шкалами, введенными для этих величин в предыдущих номограммах. Положение прямолинейной шкалы U определится из равенства $x = -\delta \frac{\mu_Q - \mu_F}{\mu_Q + \mu_F}$.

Рекомендуемые масштабы:

$$\mu_Q(h) = 5 \text{ см}, \quad \mu_U = 20 \text{ см}, \quad \mu_Q = 4 \text{ см}, \quad \mu_F = 10 \text{ см}, \quad \mu_h = 10 \text{ см}, \quad \mu_\alpha = 5 \text{ см},$$

$$\mu_U = \frac{\mu_F \cdot \mu_Q}{\mu_F + \mu_Q} = 2,86 \text{ см}.$$

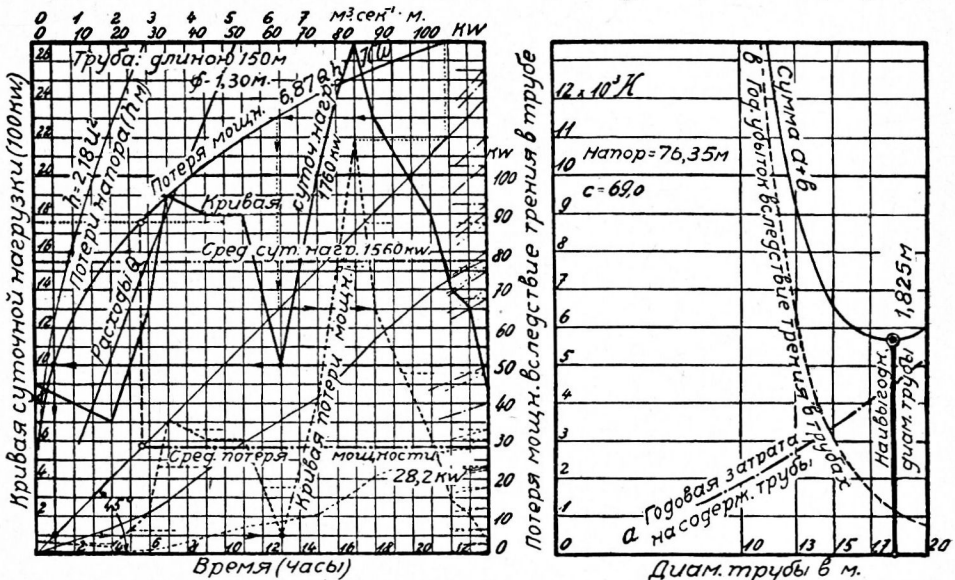
Литература.

Иное изложение вопроса у Hütte, 20 Aufg. т. III, стр. 245.

V. Определение наивыгоднейшего диаметра трубы.

При определении наивыгоднейшего диаметра напорного трубопровода, как известно, принимается в расчет следующее: годовая затрата для рассматриваемого трубопровода (стоимость труб, прокладка, содержание, амортизация) и происходящая вследствие потери напора убыль энергии (денежный эквивалент — потери энергии вследствие трения в трубах для силовых установок и затраты энергии в водоподъемных установках); наиболее выгодной считается та труба, для которой сумма всех указанных величин оказывается наименьшей.

Определение наивыгодн. диам. трубы



Черт. 24.

Мощность силовой установки определяется формулой

$$KW = \frac{1000}{102} \eta QH, \dots \dots \dots (72)$$

где Q означает расход в $\text{м}^3/\text{сек}^{-1}$, H — полезный напор и η — коэффициент полезного действия всей установки в целом. Полагаем $\eta = 0,70$; тогда рав. (72) переписется:

$$KW = 6,87 QH \dots \dots \dots (73)$$

По этой же формуле можно подсчитать потерю, возникающую вследствие трения в трубах, если только вместо H подставить величину потери напора в трубопроводе. Определение наивыгоднейшего диаметра трубы делается очень просто в том частном случае, когда нагрузка силовой установки постоянна, так как тогда известны расход Q и соответствующая потеря напора h . Вообще же, в виду изменяющихся потребностей потребителей, нагрузка силовой установки бывает отнюдь не постоянной, а наоборот — очень неравномерной. Для наиболее экономичного использования установки необходимо подобрать такой диаметр труб, чтобы потеря работы была наименьшей. Покажем на примере, как эта потеря определяется графически (черт. 24).

Прежде всего вычерчивают кривую суточной нагрузки гидростанции. Потом берут какой-нибудь размер трубы (напр., с диаметром в 1,30 м) и для трех или четырех круглых значений Q известным путем вычисляют среднюю скорость U , потерю напора $h = \xi U^2$ (в разбираемом примере $\xi = 0,18$), действующий напор H , мощность установки $L = 6,87 QH$, и, наконец, потерю мощности $V = 6,87 Qh$. Вычисленные таким образом значения потери мощности V откладываются в горизонтальном направлении от соответствующих значений нагрузки L , отмеченных на оси ординат; соединяя концы этих трех, четырех отрезков, получают кривую, позволяющую сразу определять потерю мощности V для всякой нагрузки. Далее, при помощи линии поворота, наклоненной к оси абсцисс под углом в 45° , горизонтальные отрезки, дающие величину потери мощности, переводятся в вертикальные, и именно следующим образом: через какую-нибудь точку кривой суточной нагрузки проводится горизонталь до пересечения с кривой потери мощности V ; точка пересечения при помощи вертикали проектируется на линию поворота и через полученную точку на линии поворота проводится опять горизонталь до пересечения с ординатой той точки кривой суточной нагрузки, от которой было начато построение. Отсеченный отрезок ординаты и дает величину потери мощности. Выполняя указанное построение для ряда точек, получают кривую суточной потери мощности, расположенную непосредственно под кривой суточной нагрузки. Площадь, заключенная между полученной кривой суточной потери мощности и осью абсцисс (времени) дает суточную потерю работы в KWh ; площадь же эта легко вычисляется графически путем построения линии сумм с полюсным расстоянием, равным 24^A . Последняя ордината линии сумм дает среднюю потерю мощности за сутки; при умножении ее на полюсное расстояние, равное 24^A , получается суточная потеря работы.

При выполнении описанного приема для зимней, летней, весенней и осенней кривых суточной нагрузки получается годовичная потеря работы в KWh для рассматриваемой трубы; зная же потерю работы, легко подсчитать годичный денежный убыток вследствие трения в трубах.

Чтобы подсчитать убыток для труб с другими диаметрами, вовсе не следует повторять предыдущих исследований; достаточно, взяв какое-нибудь значение расхода Q , вычислить потерю напора, соответствующую этому расходу в рассматриваемой трубе, и умножить потерю работы, найденную графическим путем для первой трубы, на отношение потери напора при взятом значении Q в новой трубе к потере напора при том же значении Q в первоначально исследованной трубе. В примере на черт. 24 потеря работы в зимний день при трубе с диаметром в 1,30 м была равна 676 KWh . Пусть для Q взято значение $3,4 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$; тогда для труб с другими диаметрами получим следующие величины потери работы:

Диаметр трубы	м	1,3	1,5	1,7	2,0
Потери напора h	м	$0,18 U^2$	$0,164 U^2$	$0,152 U^2$	$0,14 U^2$
Площадь попереч. сечения трубы F	м ²	1,33	1,76	2,26	3,14
Средн. скор. при $Q = 3,4 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$	м/сек	2,56	1,93	1,50	1,08
Потери напора h	м	1,18	0,61	0,34	0,16
„ напора, отнесенная к потере напора в 1,18 м	—	1,0	0,52	0,29	0,14
Потери работы в зимний день . .	KWh	676	351	169	95

На том же чертеже 24 для приведенных размеров труб изображены кривые годовой затраты на их содержание (a), годового убытка (b) вследствие потерь на трения и, наконец, кривая суммы $a + b$; последняя кривая показывает, что наиболее выгодной трубой будет труба с диаметром в 1,825 м.

VI. Расчет водопроводных труб.

Для вычисления диаметра водопроводных труб, по которым при уклоне I должно протекать количество воды Q , большей частью пользуются или формулой W. R. Kutter'a¹⁾

$$Q = \frac{39,25 D^3}{2m + \sqrt{D}} \sqrt{I}, \dots (74)$$

в которой для старых труб следует положить $m = 0,35$, или формулой Biegeleisen-Bukowsky'ogo²⁾

$$I = \beta \frac{Q^{1,9}}{D^{4,9}}, \dots (75)$$

где для новых чугунных труб $\beta = 0,0019$, а для находившихся уже в употреблении, старых чугунных труб $\beta = 0,004061$.

На черт. 25 дана номограмма обеих формул для старых труб. В новых трубах потеря напора приблизительно в два раза меньше, чем в старых; поэтому, взяв для I на номограмме половинное значение, с достаточной точностью определим искомый диаметр для новых труб.

Построение номограммы.

а) формулы Kutter'a

$$Q = \frac{39,25 D^3}{0,7 + \sqrt{D}} \sqrt{I}.$$

Логарифмируя, получаем уравнение:

$$\log Q - 0,5 \log I = \log \frac{39,25 D^3}{0,7 + \sqrt{D}} \quad (\text{тип I})$$

$$f_1(\alpha) = 0,5 \log I, \quad f_2(\alpha_2) = \log Q,$$

$$f_3(\alpha_3) = \log \frac{39,25 D^3}{0,7 + \sqrt{D}},$$

$$\mu_I = 10 \text{ см}, \quad \mu_Q = 5 \text{ см}, \quad \delta = 7 \text{ см},$$

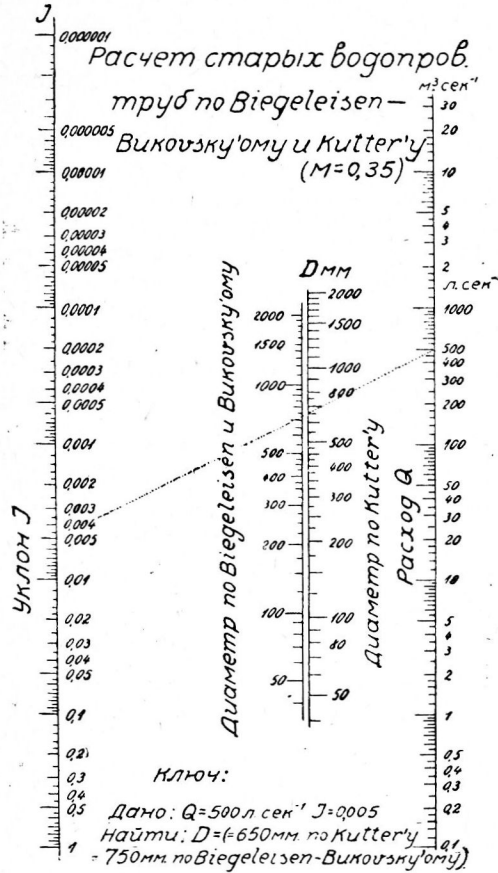
$$\mu_D = \frac{\mu_I \cdot \mu_Q}{\mu_I + \mu_Q} = \frac{10}{3} \text{ см}, \quad x = \delta \frac{\mu_I - \mu_Q}{\mu_I + \mu_Q} = +2,33 \text{ см}.$$

б) формулы Biegeleisen-Bukowsky'ogo $I = 0,004061 \frac{Q^{1,9}}{D^{4,9}}$.

Логарифмируя, получаем уравнение

$$\log I - 1,9 \log Q = \log 0,004061 - 4,9 \log D \dots (тип I)$$

$$f_1(\alpha_1) = \log I, \quad f_2(\alpha_2) = -1,9 \log Q; \quad f_3(\alpha_3) = -\log 0,004061 + 4,9 \log D.$$



Черт. 25.

¹⁾ Ph. Forchheimer, Hydraulik, Leipzig, 1914, стр. 58.

²⁾ Journal f. Gasbel. u. Wasserver. 1914, стр. 984 and Gesundheits-ingenieur 1914, стр. 477.

Масштабы для этой номограммы подбираются так, чтобы можно было пользоваться шкалами I и Q предыдущей номограммы Kutter'a; следовательно, как и прежде, логарифмическую единицу надо положить равной 5 см, и поэтому

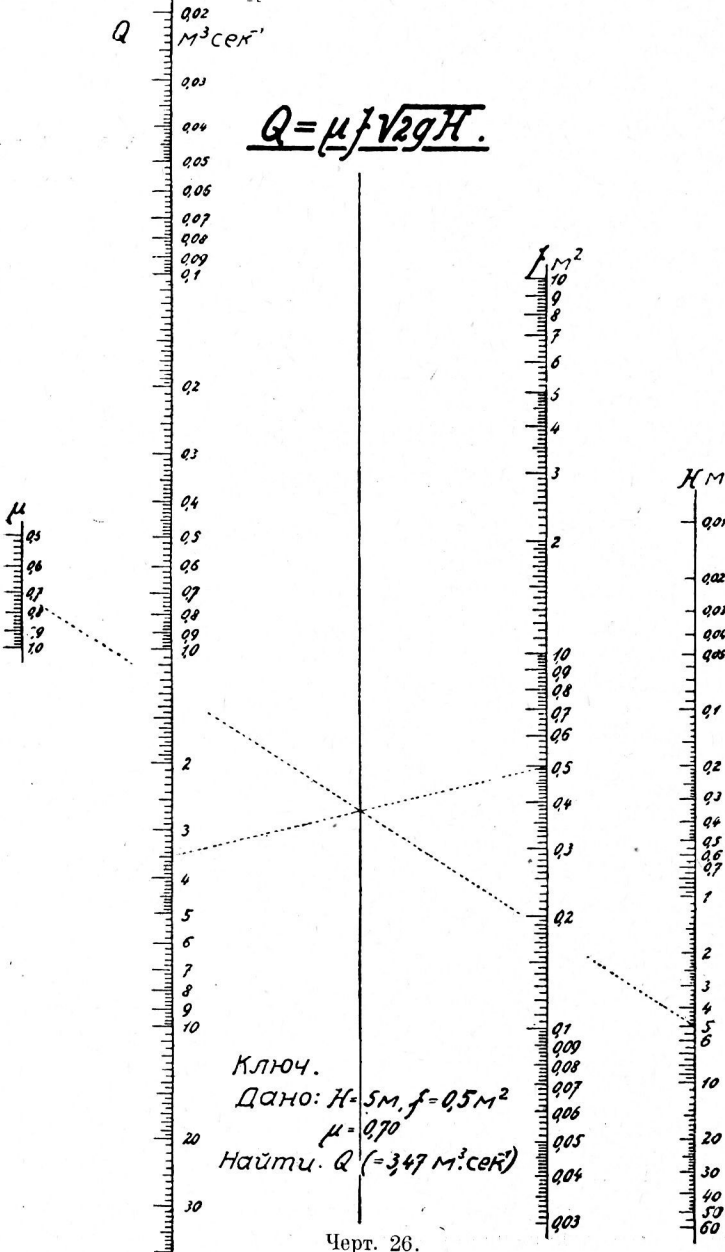
$$\mu_I = 5 \text{ см}, \quad \mu_a = \frac{5}{1,9} = 2,63 \text{ см};$$

а, следовательно,

$$\mu_D = \frac{\mu_I \cdot \mu_a}{\mu_I + \mu_a} = 1,725 \text{ см}; \quad x = \delta \frac{\mu_I - \mu_a}{\mu_I + \mu_a} = 7 \cdot 0,311 = + 2,18 \text{ см}.$$

Л и т е р а т у р а .

Другое изложение разобранного вопроса: R. Müller, Wasserversorgung, Wien, 1920, стр. 162.



Черт. 26.

VII. Истечение из отверстий.

Расход жидкости Q при истечении из сосуда через отверстие, малое по сравнению с площадью свободной поверхности жидкости в сосуде и расположенное на глубине h под ней, определяется, как известно, по формуле

$$Q = \mu f \sqrt{2gh}, \dots \dots \dots (76)$$

где μ есть коэффициент расхода, зависящий от свойств отверстия и всегда меньший единицы. Значения Q легко вычисляются при помощи номограммы на черт. 26.

Построение номограммы.

Вводя в ур. (76) вспомогательное переменное U и логарифмуя, получаем уравнения

$$\log Q - \log f - \log U = 0 \dots \dots \dots (\text{тип I})$$

$$\log \mu - \log \sqrt{2gh} - \log U = 0; \dots \dots \dots (\text{тип I})$$

номограммы этих двух уравнений строятся с общей шкалой U .

Рекомендуемые масштабы:

$$\begin{aligned} \mu_Q &= 10 \text{ см}, \mu_F = 10 \text{ см}, \text{ следовательно } \mu_u = 5 \text{ см}; \\ \mu_\mu &= 10 \text{ см}, \mu_h = 10 \text{ см}, \delta_1 = 9 \text{ см}, \delta_2 = 5 \text{ см}. \end{aligned}$$

VIII. Время опорожнения водоема неправильной формы.

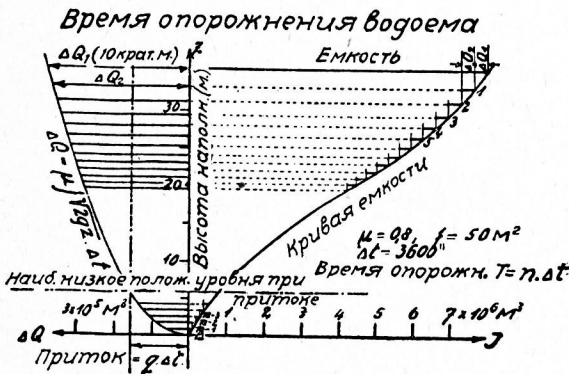
Время опорожнения водоема через отверстие, сделанное в его дне, легко вычисляется в том случае, когда форма сосуда может быть выражена аналитически; если же приходится иметь дело с водоемом неправильной формы, например, мокрым доком, то задача легко и быстро решается графически рядом последовательных приемов. За время dt из отверстия с площадью F , находящегося на глубине z под уровнем свободной поверхности, вытекает количество воды

$$dQ = \mu F \sqrt{2gz} dt \dots (77)$$

Для вычислений дифференциалы следует заменить конечными приращениями, т.-е.

$$\Delta Q = \mu F \sqrt{2gz} \Delta t \dots (78)$$

Определяем кривую емкости водоема в зависимости от высоты его наполнения и наносим ее на чертеж (черт. 27); затем наносим на тот же чертеж кривую истечения, соответствующую ур. (78), причем масштаб для нее можно взять или одинаковым, или несколько большим масштаба для кривой емкости; шкала высот уровня воды z для обеих кривых должна быть общей. Тогда горизонталь, проведенная через какую-нибудь точку шкалы z , дает в пересечении с кривой емкости величину объема, соответствующего высоте наполнения z , а в пересечении с кривой истечения—коли-



Черт. 27.

чество вытекающей воды ΔQ за время Δt при высоте уровня z . Вычитая при помощи циркуля (простого или пропорционального) значение ΔQ из объема водоема, находим высоту уровня воды в водоеме через промежуток времени Δt после начала истечения; затем продолжаем это построение до тех пор, пока водоем не будет пуст. Если для этого потребуется повторить указанное построение n раз, то время опорожнения водоема будет

$$T = n \cdot \Delta t \dots \dots \dots (79)$$

В том случае, когда одновременно с истечением в водоем вновь поступает вода, например, в количестве q в единицу времени, а значит, в промежуток времени Δt в количестве $q \cdot \Delta t$, на чертеже проводят еще кривую притока воды (прямую, параллельную шкале z). Ее пересечение с кривой истечения дает наибольшую глубину опускания уровня, возможного при наличии рассматриваемого притока. Чтобы с достаточной для практических целей точностью вычислить время опускания уровня до этой глубины, поступают попережнему, с той только разницей, что для определения положения уровня воды через промежуток времени Δt из кривой емкости вычитают не ΔQ , а разность $\Delta Q - q\Delta t$.

IX. Полный водослив.

При полном водосливе с шириною порога B расход выражается формулой:

$$Q = \frac{2}{3} \mu B \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}, \dots (80)$$

причем скоростной напор от притекающей воды в расчет не принимается.

В этой формуле H означает высоту водослива, μ — некоторый коэффициент, зависящий от формы водослива и равный 0,6 — 0,9. На черт. 28 дана номограмма этой формулы.

Построение номограммы.

Вводя вспомогательное переменное α и логарифмируя, приводим формулу (80) в двум уравнениям:

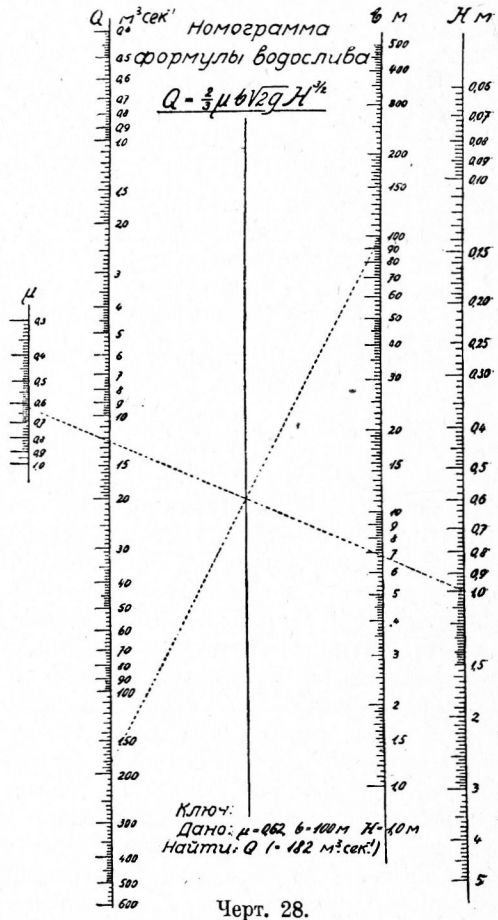
$$\log Q - \log B - \log \alpha = 0, \dots \dots (тип I)$$

$$\log \mu + \log \frac{2}{3} \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} - \log \alpha = 0 (тип II)$$

Шкала α номограмм обоих этих уравнений делается общей.

Рекомендуемые масштабы:

- $\mu_Q = 10 \text{ см.}$
- $\mu_B = 10 \text{ см.}$
- $\mu_\mu = 10 \text{ см.}$
- $\mu_H = 10 \text{ см.}$
- $\delta_1 = 5 \text{ см.}$
- $\delta_2 = 8 \text{ см.}$



Черт. 28.

Х. Колебание уровня в водоеме.

Если приток воды в водоем быстро возрастает, а сток ее происходит медленно, то наибольшее значение расхода бывает значительно меньше наибольшего значения притока. Разность между притоком и расходом идет на наполнение водоема. Пусть I_1 и I_2 означают объемы воды в водоеме в моменты времени t_1 и t_2 , z — приток, a — расход в $m^3/сек^{-1}$, Σz и Σa — суммарные приток и расход. Тогда, если объемы считать от наиболее глубокого места поперечного отверстия сточного отверстия, будем иметь, полагая $t_2 - t_1 = \Delta t$,

$$I_1 = \Sigma_1 z - \Sigma_1 a, \dots \dots \dots (81)$$

$$I_2 = (\Sigma_2 z + z \cdot \Delta t) - (\Sigma_2 a + a \cdot \Delta t), \dots \dots \dots (82)$$

$$\text{и } I_2 - I_1 = z \cdot \Delta t - a \cdot \Delta t = \Delta \Sigma z - \Delta \Sigma a \dots \dots \dots (83)$$



Черт. 29.

Графическое вычисление этой зависимости позволяет из кривой притока определить кривую расхода. Для этого наносят на чертеж справа кривую притока в масштабах μ_Q и μ_z (черт. 29), а слева — кривую емкости водоема, причем объем считается функцией расхода a . Последнее вполне возможно, так как каждому уровню воды в водоеме соответствует определенный объем и определенная величина расхода a . Далее, на оси абсцисс (времени) отмечается на расстоянии x мм от начала полюс P и известным способом строится суммарная кривая притока.

Для момента времени, от которого начинают построение кривой расхода, величина последнего должна быть известна; если, например, построение начать с того момента, когда уровень воды находится еще в установившемся состоянии, то в этот момент величины притока и расхода равны между собою. Далее поступают так: берут совершенно произвольно какое-нибудь новое значение расхода a и определяют интервал времени Δt , по истечении которого расход достигает взятой величины a . При величине расхода a_1 в момент времени t_1 объем воды в водоеме был равен I_1 , при расходе a_2 этот объем равен I_2 . Проводя через точки a_1 и a_2 на оси ординат горизонтали до пересечения с кривой емкости, получают из чертежа разность объемов $I_2 - I_1$. Наклон луча, идущего из полюса P в точку a_2 на шкале z (ось ординат), равен наклону элемента суммарной кривой расхода внутри искомого интервала времени Δt ; последнее утверждение, конечно, заключает в себе известную погрешность, так как вместо средней высоты трапеции, образуемой элементом сум-

марной кривой расхода, осью абсцисс (времени) и двумя ординатами, берется меньшая высота; однако, если разность $a_2 - a_1$ берется достаточно малой, указанная погрешность бывает незначительной. Наконец, разность объемов $I_2 - I_1$ наносят циркулем на ординату t_1 над суммарной кривой притока, как это показано на чертеже, и через верхний конец отложенного отрезка проводят параллель лучу $P - a_2$ до пересечения с суммарной кривой притока; ордината, проведенная через эту точку пересечения, дает на оси абсцисс время t_2 , а следовательно и искомый интервал Δt ; на самом деле, из чертежа легко усмотреть, что:

$$I_2 - I_1 = z \cdot \Delta t - a \cdot \Delta t = \Delta \Sigma z - \Delta \Sigma a \dots \dots \dots (83)$$

Последовательным повторением этого приема кривая расхода определяется до того момента, когда уровень воды в водоеме достигнет наиболее высокого положения. В этот момент величины притока и расхода должны быть равны между собою, и поэтому касательные к суммарным кривым притока и расхода будут параллельны, а касательная к кривой расхода горизонтальна. На основании этих замечаний можно путем соответствующих попыток определить наибольшую величину расхода.

Для определения нисходящей ветви кривой расхода следует заметить следующее: для того, чтобы расход воды, увеличившийся от a_n до a_{n+1} , опять понизился до a_n , необходимо, чтобы из водоема кроме вновь поступившей воды в количестве z вытекло еще то количество воды, которое вызвало перед этим повышение уровня в нем (и тем самым увеличение расхода от a_n до a_{n+1}). Показанным на черт. 29 образом вычерчивают от основания ординаты наибольшего расхода влево и вправо суммарные кривые притока и, кроме того, только влево — суммарную кривую расхода; полюсные расстояния берутся произвольными, но одинаковыми. Разности ординат суммарных кривых слева дают количества воды, оставшиеся в водоеме от рассматриваемого момента времени t' до момента наибольшей высоты уровня. Выбирают какое-нибудь значение расхода a и определяют из разности ординат только что упомянутых суммарных кривых, расположенных слева, количество воды, оставшееся в водоеме при увеличении расхода от значения a до a_{n+1} . Наклон искомого элемента суммарной кривой справа от a_{max} известен, так как известна средняя высота элемента кривой расхода, ограниченного ординатами a_{max} и a . Промежуток же времени, в течение которого наибольший расход a_{max} понизился опять до значения a , определяет ту абсциссу, для которой разность ординат суммарных кривых, расположенных справа, равна таковой же разности для суммарных кривых, расположенных слева. Последовательное повторение этого построения дает нисходящую ветвь кривой расхода.

Остается еще решить вопрос относительно масштабов. Кривые притока и расхода наносятся в масштабе μ_Q , время — в масштабе μ_t , кривая емкости, а также суммарные кривые — в масштабе μ_Σ . Из рассмотрения заштрихованного треугольника на черт. 29 находим:

$$x \text{ (мм)} : a \mu_Q = \Delta t \cdot \mu_t : \Delta \Sigma a \mu_\Sigma; \dots \dots \dots (84)$$

отсюда

$$x \text{ (мм)} = \frac{\Delta t \cdot \mu_t \cdot \mu_Q}{\Delta \Sigma a \mu_\Sigma}, \dots \dots \dots (85)$$

а так как $a \cdot \Delta t = \Delta \Sigma a$, то для полюсного расстояния окончательно имеем:

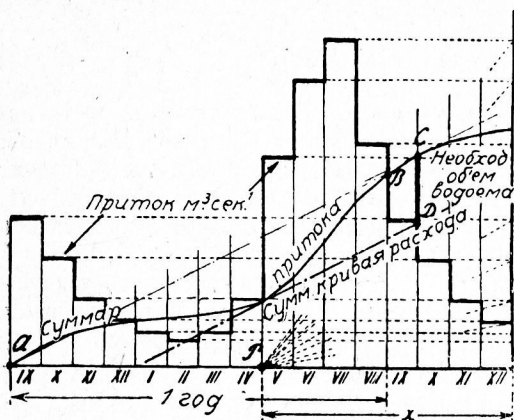
$$x = \frac{\mu_t \cdot \mu_Q}{\mu_\Sigma} \text{ (мм)}.$$

Л и т е р а т у р а.

H. Kozeny, Ztschr. d. österr. Ing. u. Arch. — Ver. Wien 1915, стр. 500.
Ph. Forchheimer, Grundriss der Hydraulik, Leipzig 1921, стр. 72.

XI. Расчет выравнивающих резервуаров.

Для определения емкости резервуара, необходимого для полного или частичного выравнивания колеблющегося притока, очень удобно пользоваться изображением притока и расхода суммарными кривыми. Наибольшая разность между ординатами обеих кривых и дает искомый объем резервуара.



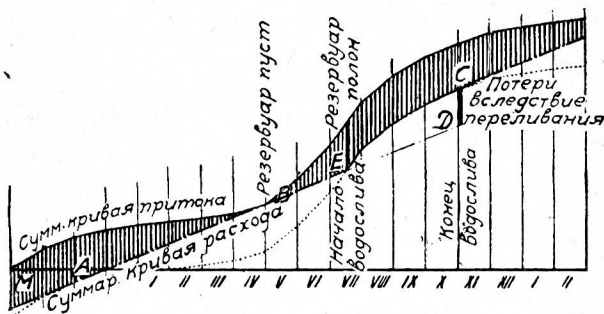
Черт. 30.

На черт. 30 дана суммарная кривая притока для целого года; прямая, соединяющая начальную и конечную точки этой суммарной кривой, дает наклон суммарной кривой расхода при условии его равномерности. Касательная, проведенная с таким же наклоном к суммарной кривой притока снизу, будет суммарной кривой наибольшего возможного равномерного расхода при полном выравнивании.

Однако, в общем случае расход бывает неравномерным. Если этот неравномерный расход известен для всего года, то можно построить для него суммарную кривую и, начертив ее на

кальке, наложить на чертеж с суммарной кривой притока, конечно, так, чтобы совпали соответственные интервалы времени, а затем передвигать ее вертикально вверх до тех пор, пока она не коснется в одной из своих точек суммарной кривой притока. Наибольшая разность ординат суммарных кривых и дает искомую емкость резервуара, необходимого для полного выравнивания.

Если полное выравнивание между притоком и расходом невозможно, определяют возможный объем резервуара в зависимости от свойств запруженного пространства и соображений строительного характера; под суммарной кривой притока проводится точно такая же кривая, только сдвинутая на расстояние, равное определенному выше объему резервуара (черт. 31). Всякая кривая (или ломаная), проведенная между этими обоими линиями, будет суммарной кривой возможного расхода. Если требуется начертить суммарную кривую равномерного расхода, поступают так. Внутри полосы между обоими суммарными кривыми (основной и сдвинутой вниз) проводят слева направо такую прямую, чтобы она касалась гребня волны нижней суммарной кривой и следующей за ней долины волны верхней суммарной. Наклон этой наименее наклоненной касательной и будет наклоном суммарной кривой наибольшего возможного равномерного расхода. Суммарной кривой действительного расхода будет ломаная *ABEC*. Между точками *E* и *C* резервуар полон и в него поступает воды больше, чем расходуется. Избыток переливается, и отрезок *CD* дает объем переливающейся воды.



Черт. 31.

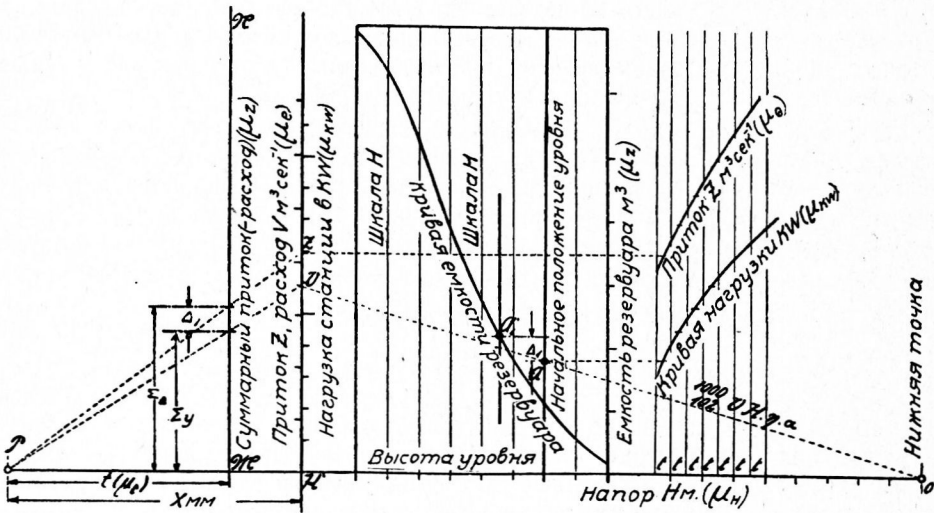
На черт. 30 показано графическое определение суммарной кривой притока по заданным притокам. Для этого, как уже было объяснено выше, средние расходы

за отдельные месяцы проектируются на ось ординат, и верхние концы полученных отрезков соединяются лучами с полюсом P , отстоящим от оси на расстоянии x . Эти лучи дают наклон элементов суммарных кривых для рассматриваемых промежутков времени. Для того, чтобы суммарные притоки можно было отсчитывать непосредственно, они откладываются в масштабе

$$\mu_z = \frac{\mu_Q \cdot \mu_t}{x}, \dots \dots \dots (42)$$

где μ_Q ($1 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1} = \mu_Q \text{ мм}$) — масштаб для притоков и μ_t ($1 \text{ сек} = \mu_t \text{ мм}$) — для времени; этим же масштабом μ_z следует, конечно, пользоваться и для суммарной кривой расхода.

Если желают принять во внимание колебания высоты уровня в резервуаре, возникающие от переменного наполнения последнего, то в расчет необходимо ввести переменный напор, и в этом случае кроме кривой нагрузки, которую станция должна



Черт. 32.

поднять, должна быть известна и кривая емкости резервуара. Время, в течение которого должно произойти выравнивание между притоком и расходом, разбивают на ряд равных интервалов (часы, дни или месяцы — в зависимости от того, приходится ли иметь дело с суточным, недельным или годовым выравнивающим резервуаром) и для каждого такого интервала определяют разность между притоком и расходом. Эти разности легко могут быть вычислены графически. Для этого следует на вертикальную шкалу (черт. 32) нанести значения притока Z (расхода V) в $\text{м}^3/\text{сек}^{-1}$ в масштабе $1 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1} = \mu_Q \text{ мм}$, на горизонтальной шкале, проходящей через нулевую точку вертикальной шкалы, отметить на произвольном расстоянии $x \text{ мм}$ полюс P , отложить по ней от этого полюса один из ранее упомянутых интервалов времени Δt в масштабе $1'' = \mu_t \text{ мм}$ и через полученную таким образом точку провести вертикаль MN . Луч, соединяющий полюс P с какой-нибудь точкой шкалы Z (V), отсекает на MN суммарный приток Σz , суммарный расход Σv в м^3 , соответствующую рассматриваемому притоку Z (расходу V). На самом деле из подобия треугольников следует:

$$Z \cdot \mu_Q : \Sigma z \cdot \mu_z = x : t'' \cdot \mu_t, \dots \dots \dots (87)$$

откуда определяется масштаб μ_Σ для суммарных притоков (расходов), откладываемых на вертикали MN :

$$\mu_\Sigma = \frac{Z \cdot t'' \cdot \mu_Q \cdot \mu_t}{x \Sigma z} \dots \dots \dots (88)$$

или, замечая, что $Z \cdot t'' = \Sigma z$,

$$\mu_\Sigma = \frac{\mu_Q \cdot \mu_t}{x} \dots \dots \dots (89)$$

Иногда бывает выгодно шкалу суммарных притоков (расходов) совместить со шкалой $Z—V$; тогда

$$t'' \cdot \mu_t = x \dots \dots \dots (90)$$

и

$$\mu_\Sigma = \frac{\mu_Q}{t''} \dots \dots \dots (91)$$

Лучи, проведенные из полюса P к точкам шкалы $Z (V)$, как уже было сказано выше, дают направления элементов суммарной кривой притока (расхода), соответствующих рассматриваемому значению $Z (V)$ в момент времени t . Если приход (расход) в $м^3/сек^{-1}$ в каждый из интервалов времени известен, суммарная кривая легко вычерчивается в виде веревочного многоугольника; следует только заметить, что для суммарных кривых, масштабы времени и сумм должны быть одинаково уменьшены по сравнению с μ_t и μ_Σ .

Если вместо расхода V дана кривая нагрузки, то прежде всего необходимо определить расход V в зависимости от напора H , и, если последний невелик, необходимо еще учесть его изменения вследствие колебаний уровня воды в резервуаре. Чтобы определить расход графически, вычерчивают, как показано на черт. 31, кривую емкости резервуара с масштабом μ_Σ для емкости, затем отмечают точку на нижнем уровне, и наконец, проводят кривую нагрузки в масштабе μ_{KW} . Мощность установки в килоуаттах, как известно, вычисляется по формуле

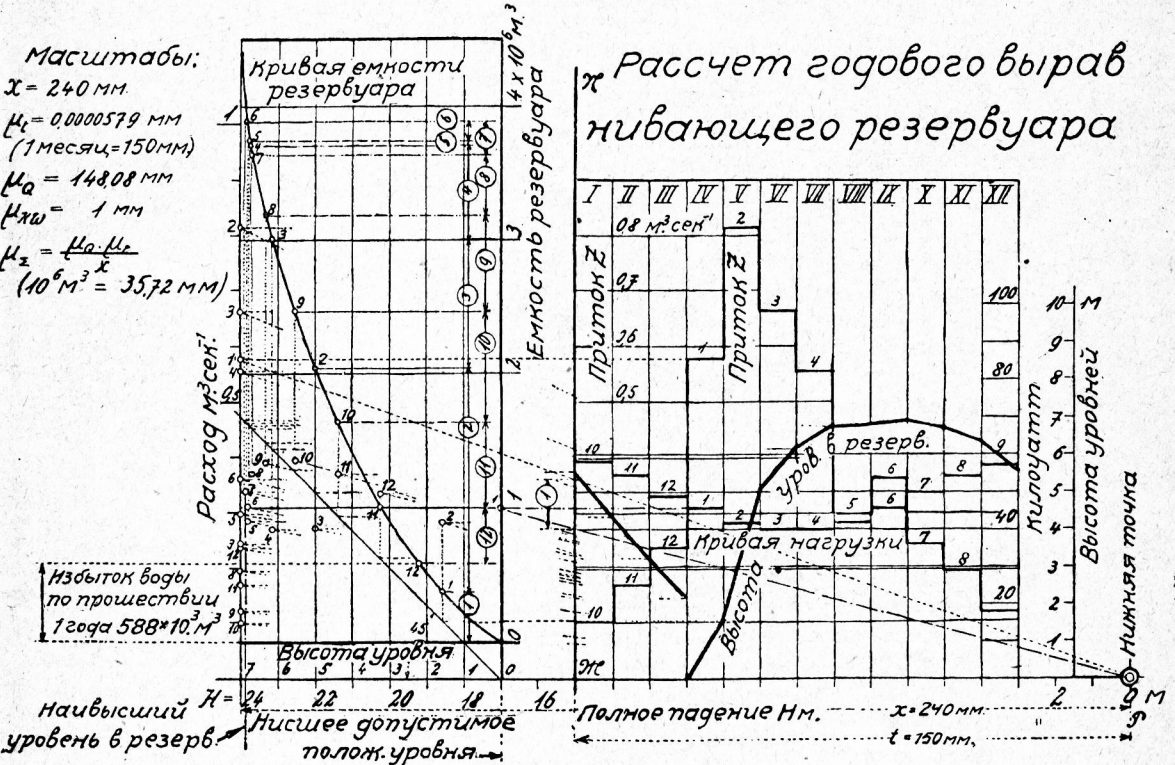
$$KW = \frac{1000}{12} V \alpha H \cdot \eta, \dots \dots \dots (92)$$

где η — коэффициент полезного действия агрегатов, и α — множитель, на который надо умножить полное падение, чтобы получить полный напор. Формула показывает, что связь между KW и H линейная, и поэтому всякий луч, проведенный через нижнюю точку и точку, соответствующую какому-нибудь расходу V , графически изображает изменение мощности установки при рассматриваемом расходе V и переменном напоре H . Далее, для какого-нибудь круглого значения V , например, для 1 или 10 $м^3/сек^{-1}$, вычисляют мощность KW при том напоре H' , для которого ранее была установлена шкала $Z—V$, и наносят вычисленное значение на ту шкалу в масштабе μ_{KW} , но у полученной на шкале точки ставят значение не мощности, а расхода V , положенного в основу вычислений; после этого уже легко нанести деления на шкалу $Z—V$ и, следовательно, определить масштаб μ_Q . И в этом случае можно взять произвольный полюс P и интервалы времени t'' откладывать уже тогда в масштабе, определяемом из соотношения

$$\mu_Q = \frac{\mu_Q \cdot \mu_t}{x}, \dots \dots \dots (93)$$

где μ_Q — масштаб делений на шкале $Z—V$, μ_Σ — масштаб объемов кривой емкости резервуара и x — полюсное расстояние (все в мм). Если теперь для какого-нибудь интервала времени требуется определить расход V , то для этого следует провести горизонталь через точку, соответствующую среднему значению нагрузки за рассматриваемый интервал времени, продолжить ее до пересечения с той из вертикальных шкал H , которая соответствует емкости резервуара в рассматриваемое время, и полученную точку пересечения соединить лучем с точкой на нижнем уровне; последний пересечет шкалу $Z—V$ в точке, соответствующей искомому значению расхода V .

Наконец, луч, соединяющий эту точку с полюсом P , отсекает на шкале MN суммарный расход ΣV за интервал t'' . Чтобы получить суммарный приток, проводят горизонталь через точку, соответствующую среднему значению притока за рассматриваемый интервал времени, до пересечения со шкалой $Z-V$, точку пересечения соединяют с полюсом P и на шкале MN получают искомый расход за интервал времени t'' . Разность притока и расхода дает количество воды, которое за время t'' вытекло (или притекло) в резервуар. Наконец, эту разность при помощи циркуля переносят на кривую емкости, чтобы таким путем определить высоту наполнения



Черт. 33.

резервуара по прошествии интервала времени t'' . Затем через точку среднего значения нагрузки в интервал времени, следующий за t'' , проводят горизонталь до пересечения со шкалой, соответствующей новому уровню H , и т. д., целиком повторяя вышеописанные построения для каждого интервала времени.

Черт. 33 дает пример этих построений. Даны: кривая притока, кривая нагрузки и кривая емкости резервуара. Напор незначителен, так что нижняя точка может быть нанесена на чертеж. Полюс P может быть взят произвольно; в разбираемом случае удобно, для упрощения построений, совместить его с нижней точкой. а шкалу $Z-V$ с вертикалью, соответствующей напору $H = 24 \text{ м}$. Так как масштаб μ_H принят равным 10 мм , то $x = 240 \text{ мм}$. Лучи, проводимые из нижней точки, могут быть теперь использованы и для определения суммарных расходов. Шкала MN , по которой отсчитываются суммарные расходы, проводится так, чтобы интервалу времени в один месяц соответствовало расстояние в 150 мм , следовательно, $\mu_t = 0,0000579 \text{ мм}$.
 По формуле

$$KW = \frac{1000}{102} V \eta \alpha H = 6,3 VH$$

вычисляют мощность установки для напора $H = 24$ м и расхода V , равного, например, $1 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$, и наносят ее в произвольном масштабе $\mu_{KW} = 1 \text{ мм}$ на шкалу $Z-V$, но полученную точку обозначают значением не мощности, а расхода $V = 1 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$, для которого вычислялась только что написанная формула. Теперь остается закончить деление этой шкалы, при чем для масштаба ее получается значение $\mu_Q = 148,08$. Суммы на шкале MN следует измерять в масштабе

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\mu_Q \cdot \mu_t}{x} = \frac{148,08 \cdot 0,0000579}{240} = 0,00003572; \dots \dots \dots (94)$$

в этом же масштабе следует нанести кривую емкости резервуара. Наконец, наносятся на чертеж кривая притока в масштабе $\mu_Q = 148,08 \text{ мм}$ и кривая нагрузки в масштабе $\mu_{KW} = 1 \text{ мм}$. Этим предварительные построения для графического расчета резервуара закончены.

В разбираемом примере процесс вычисления лучше всего начать с того момента, когда резервуар пуст, т.е. когда приток Z и расход V приблизительно равны друг другу, что бывает обыкновенно в апреле. Точка пересечения горизонтали, проведенной через среднее значение нагрузки в этом месяце, со шкалой H , соответствующей наименее низкому возможному положению уровня в резервуаре, соединяется лучом с точкой на нижнем уровне, и в точке пересечения этого луча со шкалой V отмечается значение расхода V ; этот же луч отсекает на MN соответствующий апрелю месяцу суммарный расход, а прямая, соединяющая нижнюю точку с точкой шкалы $Z-V$, соответствующей среднему значению притока за рассматриваемый месяц, отсекает на MN суммарный приток за этот месяц. Разность обеих сумм (I) отмеривается циркулем и наносится, как показано на чертеже, на кривую емкости (вверх — в случае превышения притока, вниз — в случае превышения расхода); этим определяется высота наполнения резервуара спустя месяц. Аналогичные построения проводят последовательно для остальных месяцев. Для большей наглядности черт. 33 все важнейшие точки, получающиеся в описанном построении для каждого отдельного месяца, отмечены одним и тем же номером. По прошествии года в резервуаре окажется избыток воды в 588000 м^3 , и наивысший уровень будет лежать на высоте $H = 23,8 \text{ м}$. Линия поворота, проведенная под углом в 45° , позволяет месячные высоты уровней перенести соответствующим образом под кривую нагрузки, благодаря чему связь между кривыми уровня, нагрузки и притока делается более ясной.

В качестве второго примера разберем расчет суточного выравнивающего резервуара в том случае, когда приток Z постоянен и равен $7 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$, кривая нагрузки дана, и известно, что при наибольшем возможном наполнении резервуара уровень воды в нем лежит на высоте 234 м над нижним бьефом. В этом случае прежде всего вычерчивают кривую емкости резервуара в масштабе соответствующем значительной емкости резервуара, именно, берут $\mu_{\Sigma} = 0,00132 \text{ мм}$. Нижняя точка располагается далеко за пределами чертежа, так что от пользования этой точкой для определения расхода из нагрузки приходится отказаться. Выйти из этого положения можно так: определяют по формуле

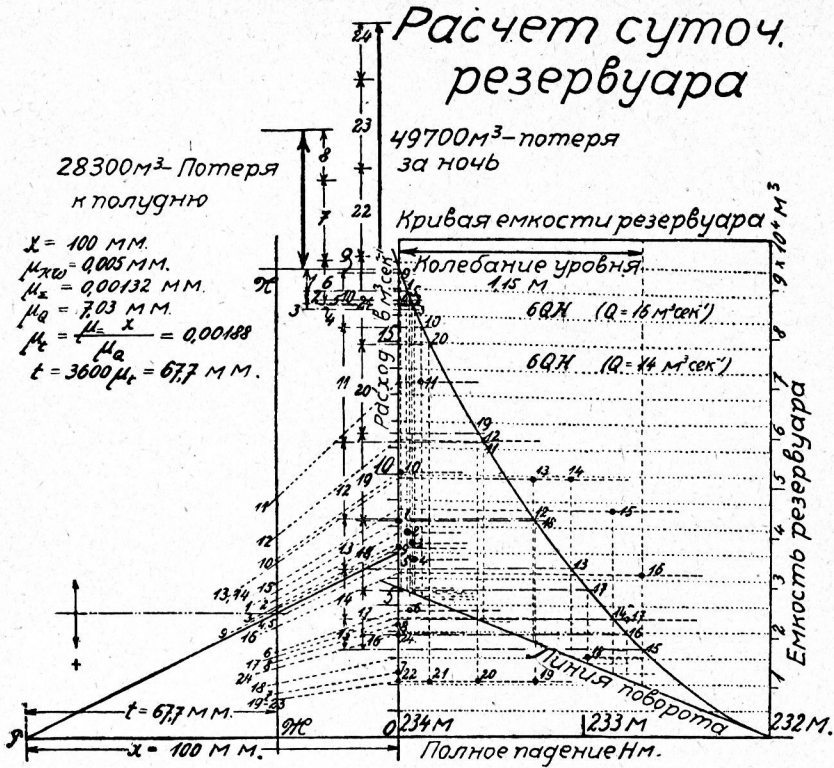
$$KW = \frac{1000}{102} \eta V \alpha H = 6 V H \dots \dots \dots (95)$$

значения мощности, соответствующие различным V при напорах $H = 234 \text{ м}$ и $H = 232 \text{ м}$, наносят их в произвольном масштабе $\mu_{KW} = 0,005 \text{ мм}$ на обе шкалы H и соединяют между собою точки, соответствующие равным значениям расхода V ; таким путем получается ряд отрезков $6H \cdot 1$, $6H \cdot 2$ и т. д. (начерчены пунктиром), которые достаточно точно показывают направление нижней точки. Этим построением одновременно произведено и деление шкалы $Z-V$, совмещенной со шкалой $H = 234 \text{ м}$; для масштаба ее получают: $\mu_Q = 7,03 \text{ мм}$. Заданную кривую суточной нагрузки вычерчивают в масштабе $\mu_{KW} = 0,005 \text{ мм}$; полюс P берут на расстоянии $x = 100 \text{ мм}$.

Тогда интервал времени в $t'' = 3600''$ следует нанести в масштабе, определяемом из соотношения

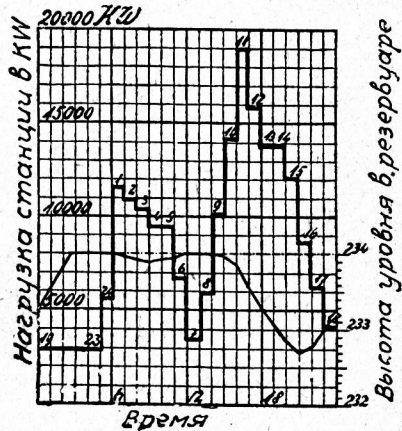
$$\mu_t = \frac{x\mu_z}{\mu_Q};$$

подстановка значений величин, входящих в правую часть, дает $\mu_t = 0,00188$ мм.



Черт. 34.

На этот раз известно наивысшее допустимое наполнение резервуара, равное 234 м: с момента такого наполнения, которое бывает в 6 часов утра, и начинают построение. Горизонталь, проведенная через отрезок «1» кривой нагрузки, пересекает шкалу $H = 234$ м в точке, которая сразу же дает значение секундного расхода, так как в разбираемом примере, как уже было сказано, шкала $H = 234$ м совмещена со шкалой $Z - V$. Луч, соединяющий эту точку с полюсом P , отсекает на MN суммарный расход, а луч, соединяющий с полюсом P точку $Z = 7$ м³/сек⁻¹, дает в пересечении с MN постоянный часовой приток. Если для какого-нибудь другого интервала времени горизонталь, проведенная через точку среднего значения нагрузки, пересекает уже шкалу H , которая не совпадает со шкалой $Z - V$ ¹⁾, то для определения расхода надо полученную точку пересечения соединить лучом с нижней точкой;



К черт. 34.

¹⁾ Переменная шкала H и постоянная шкала $Z - V$ совпадают тогда, когда $H = 234$ м, что, вообще говоря, может случиться несколько раз в течение суток. (Прим. пер.).

точка пересечения последнего со шкалой $Z—V$ дает искомый расход; но в разбираемом примере нижняя точка лежит за пределами чертежа, и поэтому приходится прибегать к помощи ранее начерченных пунктиром вспомогательных отрезков, достаточно точно дающих направления лучей из нижней точки. В дальнейшем построение ведется совершенно так же. Следует только заметить, что во время переливания воды из резервуара (вследствие его переполнения), соответствующая этому промежутку времени шкала H остается неизменной. Количество переливающейся воды, необходимый объем резервуара и наиболее низкое положение уровня легко определяются из черт. 34. Проведенная на нем же линия поворота позволяет перенести кривую уровня в уменьшенном масштабе под кривую нагрузки.

В заключение следует еще сказать, что графический расчет выравнивающего резервуара легко производится и в том случае, когда вода в резервуар поступает через напорный тоннель из другого резервуара, каким-либо способом тоже наполняемого водой. Для этого следует вычертить диаграмму, которая позволяла бы отсчитывать значение расхода через тоннель для каждой разности уровней в обоих резервуарах, и тогда уже не трудно будет указать значение притока в выравнивающий резервуар и колебание уровня в первом резервуаре. В остальном вычисления одинаковы с указанными в приведенных примерах.

Л и т е р а т у р а.

A. Schoklitsch, Die Wasserkraft, 1922.

ХII. Колебание уровня в напорных резервуарах.

Для определения кривой уровня воды в напорном резервуаре при колебаниях расхода удобнее всего применять метод последовательных построений К. Pressel'я. Пусть L — длина напорного тоннеля, z — высота уровня и h — потеря напора, считаемые относительно нормальной свободной поверхности, F — поперечное сечение тоннеля, F_s — поперечное сечение напорного резервуара и q — расход через напорную трубу. Тогда, при изменении расхода за интервал времени Δt , изменение уровня воды будет

$$\Delta z = -\frac{UF}{F_s} \Delta t + \frac{q}{F_s} \Delta t; \dots \dots \dots (96)$$

одновременно меняется и скорость на величину

$$\Delta U = \Delta t \cdot \frac{g}{L} (z - h). \dots \dots \dots (97)$$

В этих равенствах величина Δt произвольна, следовательно, может быть принята постоянной, и рав. (97) можно записать в форме

$$\Delta U = \alpha (z - h). \dots \dots \dots (98)$$

Так как связь между ΔU и $z - h$ линейная, рав. (98) графически изображается прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом α . Рав. (96) может быть представлено в форме

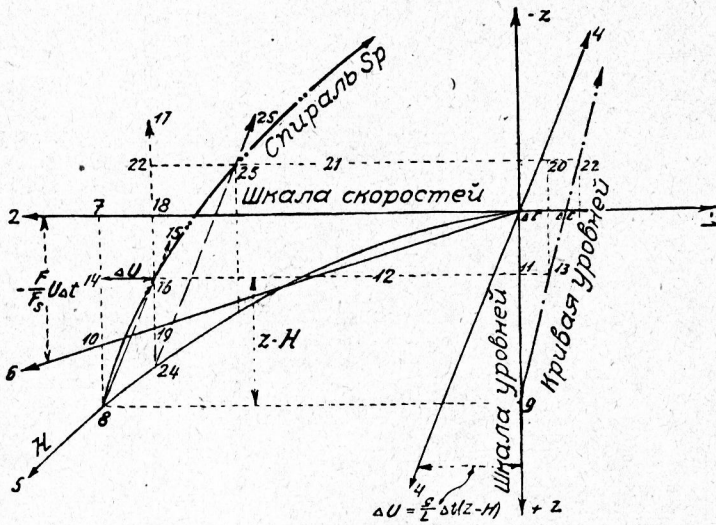
$$\Delta z = \beta U + \gamma; \dots \dots \dots (99)$$

отсюда следует, что Δz есть не что иное, как разность ординат прямой, проведенной параллельно оси U на расстоянии γ и прямой, проходящей через начало координат и наклоненной к оси абсцисс под углом β . При полном отсутствии нагрузки $q = 0$, следовательно, и $\gamma = 0$, и в этом случае

$$\Delta z = \beta U \dots \dots \dots (99a)$$

Покажем на примере способ графического определения кривой уровня для наиболее простого случая, — при полной разгрузке. На высоте нормального уровня

(черт. 35) проводят горизонталь «1—2», отмечают на ней какую-нибудь точку O , принимаемую за начальную, и вправо от этой точки наносят в произвольном масштабе шкалу времени (одно деление = Δt), а влево—шкалу скоростей U . Далее, на вертикальной прямой «3», проведенной через точку O , наносят шкалу уровней, причем отрицательные значения откладываются вверх, положительные—вниз; через точку же O проводят прямую «4», соответствующую уравнению (98). Наконец, под шкалой скоростей проводят еще в одинаковом со шкалой уровней масштабе кривую полной потери напора «5» и прямую «6», соответствующую уравнению (99а); эта прямая тоже проходит через начало O . В момент освобождения станции от нагрузки вода в тоннеле двигается с определенной, известной скоростью U ; через точку шкалы скоростей «7», соответствующую этой скорости U , проводят вертикаль до пересечения с кривой потери напора; через полученную точку «8» проводят горизонталь



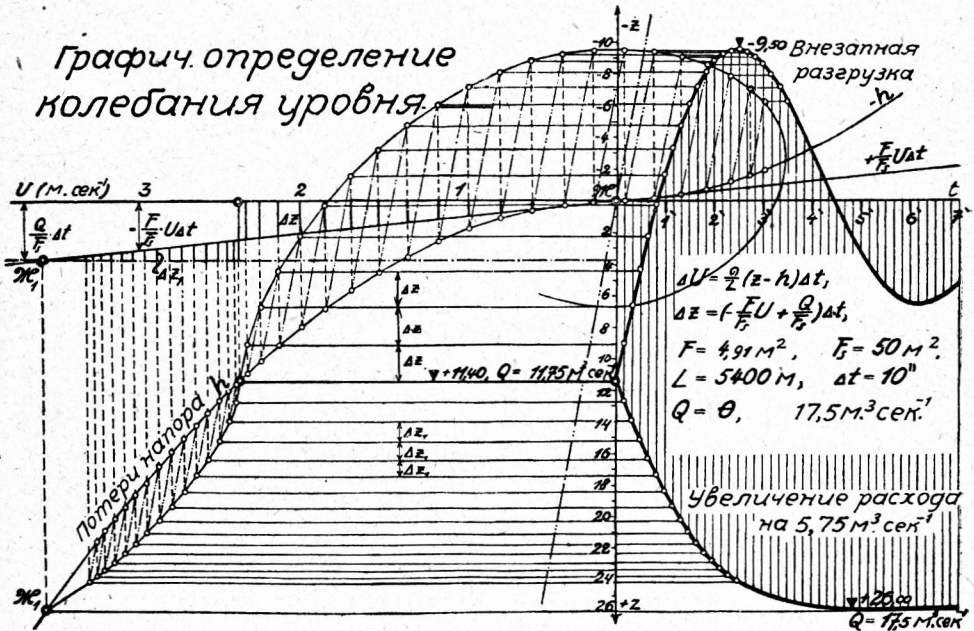
Черт. 35.

до пересечения со шкалой уровней в точке «9»; последняя и дает положение уровня перед прекращением работы станции. Отрезок же «7—10» дает величину поднятия уровня Δz , определяемого рав. (99а) в течение первого интервала времени Δt после прекращения работы. Это значение Δz откладывают от точки «9» вверх до точки «11» и через последнюю проводят горизонталь «12», на которой на расстоянии Δt вправо от точки «11» отмечают точку «13»; таким образом получают точку кривой уровня, соответствующую моменту времени Δt после остановки станции. Отрезок «8—14» изображает величину $z-h$, входящую в уравнение (98). Теперь, чтобы графически получить ΔU , остается только провести через точку «8» прямую «15», параллельную прямой «4»; тогда отрезок «14—16» дает значение ΔU , а вертикаль «17» через точку «16» определяет на шкале скоростей ту скорость U , с которой вода движется в тоннеле по прошествии первого интервала времени Δt . Отрезок «18—19» определяет значение Δz для следующего интервала времени и т. д.

Черт. 36 поясняет ход построений. При соединении точек «16», «26» и т. д. непрерывной кривой получается спираль, изображающая связь между скоростью воды в тоннеле и положением уровня в рассматриваемый момент; хотя эта связь, большей частью, не имеет значения, тем не менее кривую все-таки полезно проводить, так как ее непрерывность является простым контролем правильности построения.

Аналогично ведется построение и в том случае, когда приходится иметь дело с одним только изменением расхода; в равенство (96) подставляется новое значение q и соответственно этому под шкалой U , на расстоянии $\gamma = \frac{q}{F_s} \Delta t$, проводится прямая;

тогда, как уже было сказано, разность ординат последней прямой, параллельной шкале U , и наклонной прямой, соответствующей члену $-\frac{UF}{F_s} \Delta t$ (сравн. черт. 36), и дает значение Δz . Если напорный резервуар имеет водослив, то указанное построение доводят до тех пор, пока уровень не достигнет наивысшего положения над порогом водослива; начиная с этого момента, уравнение (96) уже не имеет места. В этом случае над шкалой U следует из точки шкалы уровня, соответствующей высоте порога водослива, провести прямую, которая указывала бы зависимость между высотой водослива и расходом UF , соответствующим скорости U в тоннеле, и вместе с тем определяла бы и положение уровня для каждой скорости U .



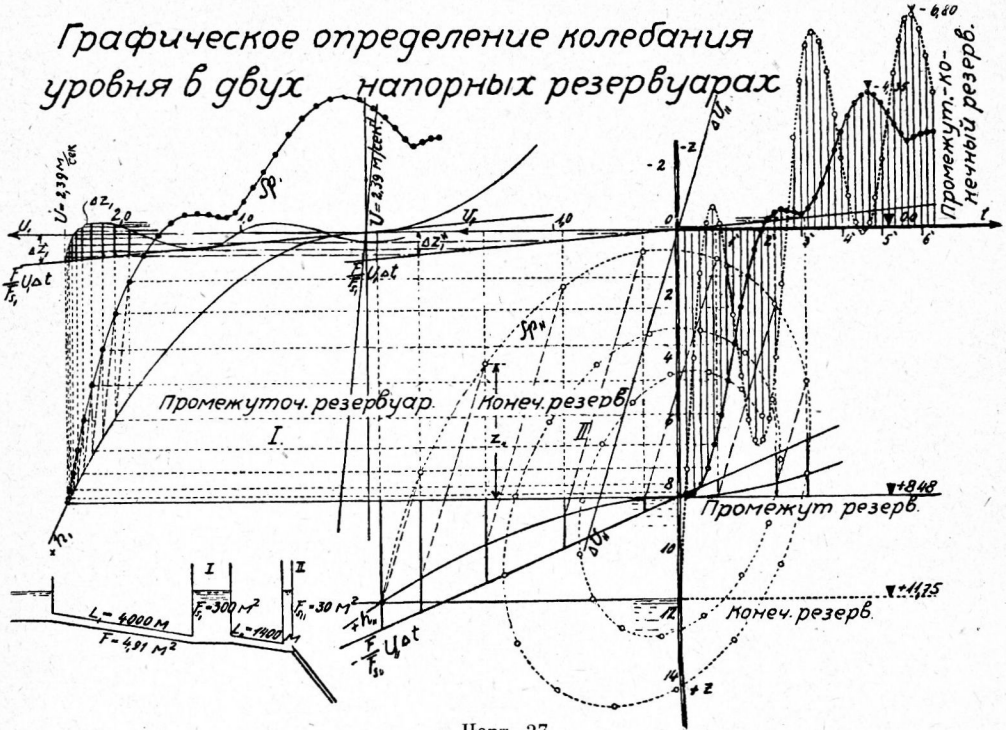
Черт. 36.

$z_{90} = 60$

Для двух напорных резервуаров, расположенных друг за другом (например, для небольшого выравнивающего резервуара в середине тоннеля и узкого резервуара в его конце) тоже легко определить графически кривые уровней. Черт. 37 поясняет ход построения, в существенных чертах сходного с построением, разобранным на черт. 36. Построение начинают с конечного резервуара; чтобы получить точки спирали $S_{\text{пл}}$, обозначавшиеся на черт. 35 числами 16, 26 и т. д., поступают несколько иначе, чем прежде, а именно: так как уровень промежуточного резервуара, относительно которого происходят колебания в конечном резервуаре, сам находится в движении, следует уже, при помощи горизонталей, проектировать не значение уровня в конечном резервуаре, а разность высот уровней z_{II} в промежуточном и конечном резервуарах, отмеривая ее циркулем; но для промежуточного резервуара высота уровня может быть определена, так как высота уровня у плотины полагается постоянной; но и здесь нельзя сразу получить значение z , так как вода, необходимая для поднятия уровня в конечном резервуаре, поступает туда из промежуточного резервуара, уменьшая в нем высоту уровня. В результате, за интервал времени Δt в промежуточном резервуаре высота уровня изменяется на величину

$$\Delta z_1 = -\frac{F_I U_I}{F_{s1}} \Delta t + \frac{F_{II} U_{II}}{F_{s1}} \Delta t = -\Delta z_1' + \Delta z_1'' \dots \dots \dots (100)$$

Для графического вычисления этого выражения под шкалами U_I и U_{II} проводят прямые, угловые коэффициенты которых равны соответственно $\frac{F_I U_I}{F_{s1}} \Delta t$ и $\frac{F_{II} U_{II}}{F_{s1}} \Delta t$, при чем каждая из этих прямых проходит через свою начальную точку; эти прямые и шкала U (общая) отсекают на вертикалях через точки шкалы U значения Δz_1 и $\Delta z_1''$, соответствующие рассматриваемым значениям скоростей U_I и U_{II} . Проектируя при помощи горизонталей $\Delta z_1''$ на $\Delta z_1'$, получают искомое значение Δz_1 . Кривая, соединяющая найденные таким образом точки, имеет волнообразный вид, что вполне



понятно: когда в конечном резервуаре уровень воды повышается, в промежуточном вода убывает, и там поднятие уровня начинает замедляться; когда же в конечном резервуаре уровень начинает опускаться, вода начинает вновь поступать в промежуточный резервуар, ускоряя в нем поднятие уровня.

До сих пор мы предполагали сечение напорного резервуара постоянным; в чашеобразных же резервуарах или в тоннелях-резервуарах сечение бывает переменным, и для этих случаев на черт. 35 вместо прямой «б» проводится вниз от шкалы U вертикальная прямая, при чем эта прямая проводится через то значение скорости, которое ни в коем случае не достигается при рассматриваемом изменении расхода.

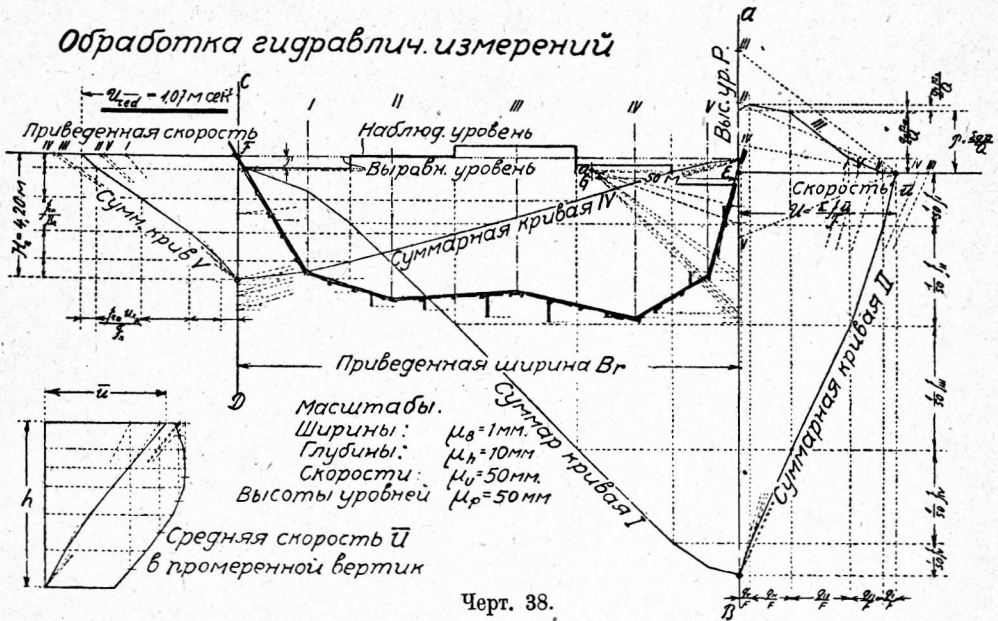
На эту вертикальную шкалу наносятся значения величины $-\frac{FU}{F_s} \Delta t$, но деления отмечаются значениями F_s ; при каждом таком построении соединяют начальную точку с соответствующей точкой этой шкалы. Вычертив надлежащим образом рядом с этой же шкалой диаграмму площадей поперечных сечений резервуара, легко для каждой высоты уровня определить площадь соответствующей свободной поверхности F_s .

Л и т е р а т у р а.

A. Schoklitsch, Schweizer Bauzeitung, 1923.—Другие способы: F. Prazil, Schweizer Bauzeitung, 52 (1908), стр. 271.—E. Braun, Ztschr. für das ges. Turbinenwesen, 1920.—R. Tillman, Die Wasserkraft, 1921.

ХШ. Обработка измерений скорости в реках и каналах.

При измерении скоростей в широком русле вертушкой Woltmann'a приходится делать промеры вертикалей, на что большей частью уходит много времени; в это время уровень воды только в очень редких случаях остается неизменным; колебания уровня обыкновенно вызываются изменением расхода, которое, в свою очередь, вызывается колебаниями в нагрузке станции или же изменениями притока. Если эти колебания превосходят 5 см, ими уже нельзя пренебрегать; необходимо определить «выровненный» уровень, привести к нему измеренные скорости и уже по этим приведенным скоростям определять расход; все эти вычисления легко выполняются графическим путем.



Прежде всего необходимо из наблюдаемых скоростей вращения вертушки в отдельных местах какой-либо вертикали определить существующие там скорости и по последним уже вычислить среднюю скорость \bar{u} для этой вертикали. Определение скоростей u для отдельных точек вертикали удобнее всего производится при помощи номограммы, которая для каждого прибора легко строится по уравнению вертушки. Затем, отмечая скорости в отдельных точках на чертеже (черт. 38), получают кривую распределения скорости по вертикали. Для определения средней скорости \bar{u} , следует площадь, ограниченную кривой распределения, свободной поверхностью, дном и рассматриваемой вертикалью, разбить на полосы и построить для этой площади суммарную кривую с полюсным расстоянием, равным глубине воды h (черт. 38, слева внизу); конечная ордината суммарной кривой и дает среднюю скорость \bar{u} ¹⁾.

После того, как средние скорости \bar{u} для всех промеренных вертикалей вычислены, следует определить выровненный уровень воды. Для этого вычерчивают промеряемое поперечное сечение вместе с вертикалями и делят расстояния между вертикалями пополам, так что для каждой вертикали получается своя полоса. Далее, если расход через такую полосу обозначить через q , а уровень воды в ней, отнесен-

¹⁾ Так как полюсное расстояние взято равным базису. (Прим. пер.).

ный к наблюдаемому уровню первой промерной вертикали, — через p , то высота среднего наблюдаемого уровня определится равенством

$$P = \frac{\Sigma pq}{\Sigma q} \dots \dots \dots (101)$$

Чтобы графически вычислить это выражение, определяют при помощи суммарной кривой площади отдельных полос поперечного сечения, а также и всего поперечного сечения. Для этого все полосы, кроме первой, надо сдвинуть вниз так, чтобы они были на одном уровне с первой полосой; после этого проектируют на шкалу уровней AB середины каждой, уже сдвинутой, стороны полигона, на который разбито дно промеренными вертикалями, при чем и основания проведенных ранее прямых следует считать за вершины полигона; наконец, на свободной поверхности воды на произвольном расстоянии от AB (например, в 50 метрах) берется полюс P и известным образом строится суммарная кривая площади. Ординаты этой суммарной кривой, умноженные на полюсное расстояние, дают искомые площади.

Теперь от точки пересечения F линии уровня первой промерной вертикали со шкалой AB откладывают вправо ранее вычисленные средние скорости u по вертикалям (все — начиная от точки E) и определяют расход через каждую полосу и среднюю скорость через все сечение. Эта задача опять сводится к определению площадей при помощи суммарной кривой, именно: следует найти площади прямоугольников, основания которых равны $\frac{1}{50} \cdot f^1$, а высоты — u (вычерчивать эти прямоугольники нет необходимости, так как их основания уже отмечены на шкале AB , а высоты, которые при построении суммарной кривой должны были бы проектироваться на горизонтальную прямую, проходящую через E , тоже уже отложены на этой прямой); а затем определить среднюю скорость течения через рассматриваемое поперечное сечение, т.-е., высоту прямоугольника с основанием $\frac{1}{50} \cdot F$ и площадью $\Sigma \frac{1}{50} f u$. Полюсное расстояние берется равным $\frac{1}{50} \cdot F$, так что конечная ордината суммарной кривой сразу даст искомую среднюю скорость $U = \frac{\Sigma \frac{1}{50} f u}{\frac{1}{50} F}$. Действи-

тельно в этом случае разности ординат суммарной кривой III, соответствующие отдельным полосам поперечного сечения, равны:

$$\frac{\frac{1}{50} f u}{\frac{1}{50} F} = \frac{f u}{F} = \frac{q}{F} \dots \dots \dots (102)$$

и конечная ордината, как это и требуется, равна:

$$\frac{\Sigma \frac{1}{50} f u}{\frac{1}{50} F} = \frac{\Sigma q}{F} = U \dots \dots \dots (103)$$

Затем на вертикали AB от точки E откладывают уровни p отдельных вертикалей (+вверх, — вниз), лучше всего увеличенные в пять, десять раз, и для прямоугольников с основаниями $\frac{q}{F}$ и высотами p строят суммарную кривую III, определяя таким образом их площадь и высоту равновеликого прямоугольника с основанием U . Полюсное расстояние берется равным U , так что конечная ордината этой суммарной кривой

$$\frac{\Sigma \frac{qp}{F}}{U} = \frac{\Sigma qp}{Q} = P \dots \dots \dots (101)$$

1) f — площади упоминавшихся полос. (Прим. пер.)

как раз дает искомый выровненный уровень, который и откладывается от уровня первой промерной вертикали (+ вверх, — вниз), предварительно только уменьшенный соответственно сделанному ранее увеличению масштаба p .

К этому выровненному уровню следует теперь привести вычисленные по наблюдениям средние скорости \bar{u} . Если глубина промерной вертикали равна h , а выровненная глубина h_r , то для наблюдаемой и приведенной скоростей имеем выражения:

$$\bar{u} = cI^2 h^v \dots (104)$$

$$\bar{u}_r = cI^2 h_r^v, \dots (105)$$

так что приведенная скорость

$$\bar{u}_r = \bar{u} \left(\frac{h_r}{h} \right)^v \dots (106)$$

Для v берутся различные значения, от 0,6 до 1,0, в зависимости от шероховатости русла. Вычисление этой формулы легко производится при помощи номограммы на черт. 39.

Определение среднего наблюдаемого уровня воды дает возможность вполне точно установить середины и крайних, прилежащих к берегу, сторон полигона, на который раньше было разбито дно, после чего при помощи суммарной кривой IV определяется площадь F_r приведенного поперечного сечения, при чем полюсное расстояние берется равным ширине B_r свободной поверхности при среднем наблюдаемом уровне. Все построения, относящиеся к приведенному поперечному сечению, для ясности выполняются с левой стороны поперечного сечения. Разности ординат суммарной кривой IV равны $\frac{f_r}{B_r}$, а ее конечная ордината

$$\frac{\sum f_r}{B_r} = \frac{F_r}{B_r} = H, \dots (107)$$

дает среднюю глубину приведенного поперечного сечения.

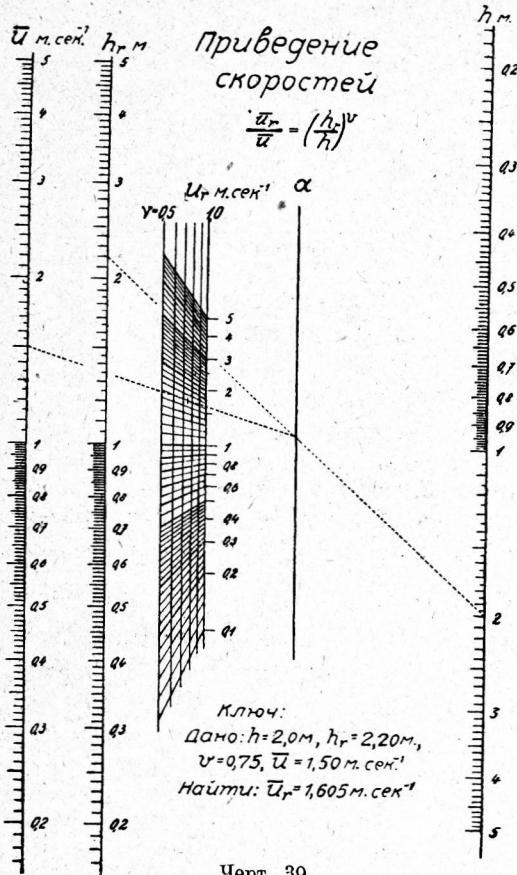
Наконец от точки F пересечения среднего наблюдаемого уровня с вертикалью CD откладываются влево от F приведенные скорости \bar{u}_r (все начиная от F); нанесенные отрезки рассматриваются как проекции высот прямоугольников, основания которых равны $\frac{f_r}{B_r}$, а высоты \bar{u}_r . Остается начертить суммарную кривую V с полюсным расстоянием H_r ; ее конечная ордината

$$\frac{\sum \frac{f_r}{B_r} \bar{u}_r}{H_r} = \frac{\sum f_r \bar{u}_r}{B_r H_r} = \frac{Q_r}{F_r} \dots (108)$$

и дает искомое значение средней скорости через рассматриваемое поперечное сечение.

Л и т е р а т у р а.

Pawelka, Ztschr. d. Osster. Ing.-u. Arch.-Ver. 1904, стр. 116. — Другой способ W. Reitz Ztschr. f. Gewässerkunde, 7 (1908), S. 175.



Черт. 39.

XIV. Обработка наблюдений над уровнем воды.

1. Кривая частоты и кривая продолжительности.

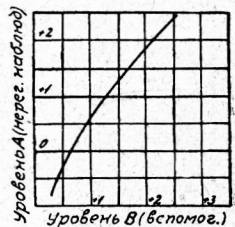
Наблюдения над уровнем в реке, производимые ежедневно в многочисленных местах, имеют свою цель выявить частоту стояний воды на определенной высоте, а также и продолжительность таких стояний. Пользуясь записью произведенных за год наблюдений, отмечают, сколько дней в году наблюдалась определенная высота уровня, при чем эти высоты берутся через определенный промежуток, например, в 10 см, так что уровни

от — 20	до — 11	принимают за уровень — 15
„ — 10	„ — 1	„ „ „ — 5
„ 0	„ 9	„ „ „ — 5
„ 10	„ 19	„ „ „ 15 и т. д.

Подсчитанную таким образом частоту стояний воды на определенной высоте откладывают в виде отрезков, перпендикулярных к шкале уровней в соответствующих точках. В результате получается кривая частоты. Кривой продолжительности стояний воды на определенных высотах будет суммарная кривая для кривой частоты, проведенная от наиболее высокого уровня вниз; она показывает, сколько дней в году уровень воды не опускается ниже определенной высоты. Полюсное расстояние следует выбрать так, чтобы масштаб для кривой продолжительности был тот же, что и для кривой частоты. Для этого отложенные значения частот надо рассматривать, как средние высоты трапеций, у которых расстояния между параллельными сторонами равны 1 (т.е. считать за единицу принятый в основу построения 10-сантиметровый промежуточный интервал между уровнями), и это расстояние принять за полюсное.

2. Связь между высотами уровня в различных сечениях.

Часто бывает необходимо определить картину изменения высоты уровня в поперечном сечении, в котором не производились регулярные наблюдения. Это можно сделать, если имеются регулярные наблюдения для какого-нибудь другого поперечного сечения, и следовательно, известно для него соотношение между высотой уровня и расходом. Тогда, зная для рассматриваемого поперечного сечения высоты уровня для нескольких, по возможности различных, но установившихся расходов, можно связать их с высотами уровня при равных расходах в том поперечном сечении, где наблюдения производились регулярно, и изобразить эту связь графически (черт. 40). Полученная таким образом связь дает возможность очень просто по уровням в поперечном сечении, где наблюдения производились регулярно, определять уровни в сечении, для которого систематических наблюдений не имеется.

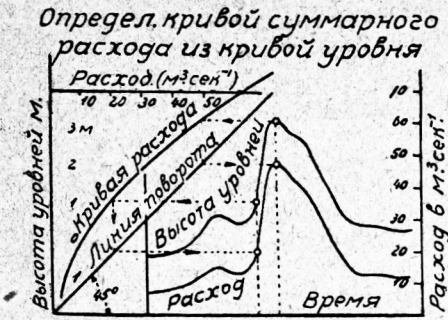


Черт. 40.

3. Кривая суммарного расхода.

Расходы за отдельные дни, средние и суммарные расходы за отдельные промежутки времени и, наконец, суммарный годовой расход обыкновенно определяются из наблюдений над уровнем. Для графического решения этих задач вычерчивают, как показано на черт. 41, кривую расхода рядом с кривой уровня. Тогда на горизонтальных, проведенных через рассматриваемые значения уровня, кривая расхода отсе-

кает значения расхода в виде горизонтальных отрезков, которые при помощи линии поворота, проведенной под углом в 45° , переводятся в вертикальное положение и откладываются на ординатах соответствующих им уровней. При этом достаточно определить расходы только для некоторых, характеристических точек кривой уровня; сделав это, соединяют вершины полученных отрезков (ординат) непрерывной кривой. Заменяв теперь эту кривую ломаной линией, строят для нее суммарную кривую с полюсным расстоянием, равным базису кривой уровня. Конечная ордината суммарной кривой изображает средний расход за рассматриваемый промежуток времени; этот же средний расход, будучи умножен на полюсное расстояние, дает суммарный расход за рассматриваемый промежуток времени.



Черт. 41.

XV. Просачивание под плотинами.

В большинстве случаев среднюю скорость U подпочвенного течения воды принимают равной

$$u = kI, \dots \dots \dots (109)$$

где I означает уклон подпочвенного потока, а k — коэффициент проницаемости почвы, т.е. скорость при уклоне, равном единице. Под u впрочем понимают не действительную скорость, а так называемую скорость просачивания, т.е.

$$\frac{\text{расход в м}^3/\text{сек}^{-1}}{\text{поперечное сечение подпочвенного потока в м}^2}$$

Так как подпочвенное движение воды — движение слоистое ¹⁾, то коэффициент проницаемости k зависит от размеров зерен песка и от его температуры; последняя зависимость мало заметна, так как температура подпочвенных вод в течение всего года колеблется в очень незначительных пределах около своей средней годовой температуры. Зависимость k от величины зерен подпочвенного слоя и от его расположения очень значительна; в виду трудности постановки опытов для измерения коэффициента проницаемости приходится прибегать к непосредственным наблюдениям.

Е. Prinz ²⁾ дает следующие величины коэффициента пропускаемости, определенные им в естественных условиях:

	м/сек. ⁻¹
Дюнный песок	$k = 0,0002$
Песок со следами глины	$k = 0,0008$
Речной песок 0,1—0,3 см	$k = 0,0025$
" " 0,1—0,8 см	$k = 0,0088$
Фильтровый песок	$k = 0,0077$
Мелкий гравий 2,0—4,0 см	$k = 0,0300$
Более крупный гравий 4,0—7,0 см	$k = 0,0351$

Частицы воды при своем продвижении в подпочвенном потоке следуют по траекториям, отчасти сходным с траекториями частиц движущейся идеальной жидкости; линии тока всегда перпендикулярны к линиям равного давления; количество жидкости, протекающей между двумя линиями тока, остается постоянным.

¹⁾ Т.е. так называемое ламинарное (режим Poiseuille'я). (Прим. ред.)

²⁾ Handbuch der Hydrologie. Berlin 1919, стр. 135.

Если расстояние между двумя линиями равного давления равно dn , а разность давления между ними равна dh , то в этом месте уклон равен

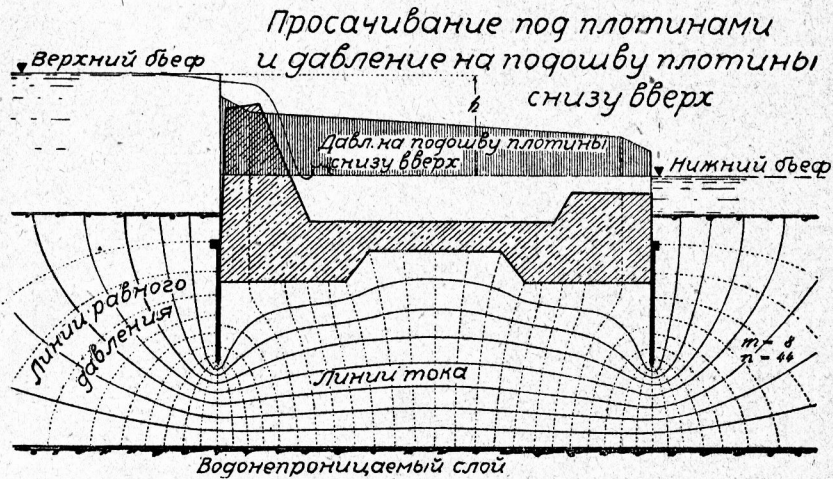
$$I = \frac{dh}{dn}, \dots \dots \dots (110)$$

а количество жидкости, протекающей между двумя параллельными плоскостями, отстоящими друг от друга на расстоянии, равным единице, и двумя линиями тока с расстоянием между ними, равным ds , будет

$$dq = u \cdot df = \left(k \cdot \frac{dh}{dn} \right) \cdot ds \dots \dots \dots (111)$$

Если взять линии тока так, чтобы между каждыми двумя последовательными линиями протекало одинаковое количество воды, а линии равного давления выбрать так, чтобы разности давлений между ними были равны, то тогда

$$dq = \text{const} = \text{const} \cdot \frac{ds}{dn}; \dots \dots \dots (112)$$



Черт. 42.

а это значит, что отношения сторон прямоугольников, образуемых пересечением семейств линий тока и линий равного давления, одинаковы для всех прямоугольников и равны $\frac{ds}{dn}$. Можно подобрать dq и dh так, чтобы прямоугольники обратились в квадраты. В результате получается сеть квадратов, которой можно воспользоваться для определения просачивания под плотиной, подпорной стеной и т. д. Для примера разберем просачивание под плотиной. Указанным на черт. 42 образом вычерчиваем между подошвой плотинны и водонепроницаемым слоем сеть квадратов. Если ширину плотинны принять за единицу, то площадь поперечного сечения между двумя линиями тока будет $df = 1 \cdot ds$; далее, если в полосе между двумя линиями тока имеется n квадратов, то потеря напора вдоль стороны квадрата равна

$$dh = \frac{h}{n}, \dots \dots \dots (113)$$

а уклон вдоль стороны квадрата с длиной стороны ds равен

$$I = \frac{dh}{ds} = \frac{\frac{h}{n}}{ds}; \dots \dots \dots (114)$$

расход через эту полосу будет

$$dq = u \cdot df = k \cdot \frac{h}{n} \cdot ds = k \cdot \frac{h}{n} \dots \dots \dots (115)$$

Если под плотиной таких полос m , то расход на единицу длины под плотиной выразится

$$Q = m \cdot dq = \frac{m k h^3}{n} \dots \dots \dots (116)$$

В примере, изображенном на черт. 42, число квадратов получается равным $u \cdot m = 44 \cdot 8 = 352$; если положить $k = 0,014$ и $h = 2,0$ м, получим, что на 1 м длины плотины (по течению) количество просачивающейся воды будет

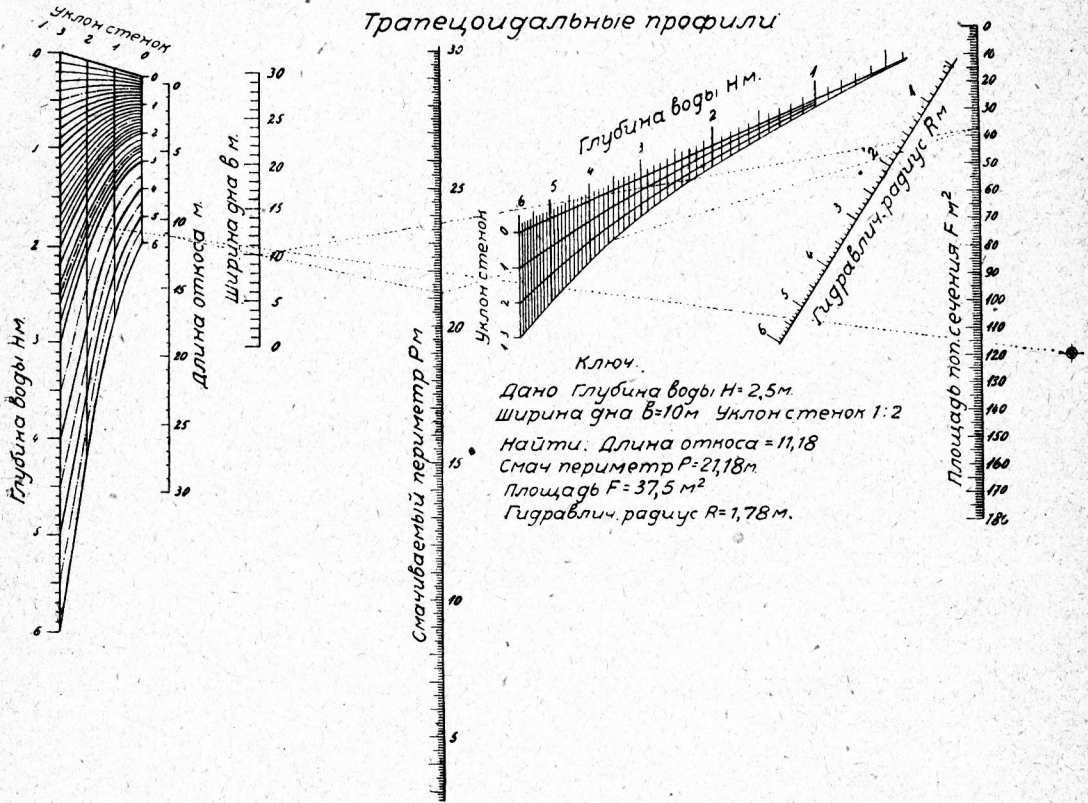
$$Q = 0,0051 \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}.$$

Литература. Ph. Forchheimer, Hydraulik, Leipzig 1914, стр. 448.

Добавление.

1. Гидравлический радиус трапециoidalных профилей.

Размеры трапециoidalного профиля, именно — площадь его F , смачиваемый периметр P , гидравлический радиус R , ширина основания b и длина откоса легко вычисляются номографически. Как известно, при глубине воды H и уклоне стенок



Черт. 43.

(от вертикали) ¹⁾ v , площадь поперечного сечения будет $F = bH + vH^2$, смачиваемый периметр $P = b + 2H\sqrt{v^2 + 1}$, а гидравлический радиус $R = \frac{F}{P}$.

На черт. 43 дана номограмма для вычисления этих величин. Соединяя точку семейства кривых с левой стороны номограммы, соответствующую заданным значениям

¹⁾ v есть tangens угла, образуемого стенкой с вертикалью. (Прим. ред.).

H и v , прямой линией с полюсом с правой стороны номограммы, получаем на шкале длин откоса точку, соответствующую длине $2H\sqrt{v^2+1}$. Соединяя эту точку с точкой, соответствующей ширине основания профиля b , получаем на шкале значение смачиваемого периметра. Далее, соединяя точку, соответствующую ширине основания b с точкой в середине номограммы, соответствующей заданным H и v , получим площадь поперечного сечения и, наконец, соединив точку, соответствующую найденной площади, с точкой, соответствующей величине смачиваемого периметра, найдем гидравлический радиус.

Построение номограммы. Как уже было сказано, смачиваемый периметр трапециoidalного профиля выражается формулой $P = b + 2H\sqrt{v^2+1}$. Это уравнение, если v считать постоянным, относится к типу I. Семейство кривых с левой стороны номограммы получается так: проводятся вертикальные шкалы, соответствующие разным уклонам стенок; значения $2H\sqrt{v^2+1}$, соответствующие каждому уклону, наносятся на шкалу длин откоса, и точки этой шкалы соединяются прямыми с полюсом с правой стороны номограммы; эти прямые пересекают шкалы уклонов стенок в точках, соответствующих значениям H . Соединяя точки с одними и теми же значениями, получают семейство кривых, изображенное на чертеже.

Для вычисления площади поперечного сечения имеем уравнение:

$$-F + bH + vH^2 = 0 \text{ (тип III),}$$

при чем $f_1(\alpha_1) = B$, $f_2(\alpha_2) = -F$, $f_3(\alpha_3) = H$, $\varphi_3(\alpha_3) = 1$ и $\psi_3(\alpha_3) = vH^2$.

И здесь получается семейство кривых, так как v имеет разные значения. При построении этой номограммы в качестве шкалы для b используется аналогичная шкала предыдущей номограммы.

Наконец, для определения гидравлического радиуса имеем уравнение $R = \frac{F}{P}$ (тип. II), которое также изображается номографически, притом так, чтобы шкалы P и F были общими с аналогичными же шкалами предыдущей номограммы.

Номограмма получается в виде буквы Z с наклонной шкалой для R .

2. Прирост населения в обслуживаемой местности.

Если число жителей в текущий момент обозначить через E_0 , ежегодный прирост населения в процентах — через Z , то через n лет число жителей будет равно

$$E = E_0 \left(\frac{100 + Z}{100} \right)^n \dots \dots \dots (117)$$

Подсчет по этой формуле производится при помощи номограммы на черт. 44.

Построение номограммы. Логарифмируя рав. (117), получаем:

$$\log E - \log E_0 - n \log \left(\frac{100 + Z}{100} \right) = 0; \dots \dots \dots \text{(тип. I)}$$

$$u = \mu_1 \log E_0, \quad v = \mu_2 n, \quad \text{тогда} \quad \mu_2 u + \mu_1 v \log \left(\frac{100 + Z}{100} \right) - \mu_1 \mu_2 \cdot \log E = 0,$$

откуда $A = \mu_2, \quad B = \mu_1 \log \left(\frac{100 + Z}{100} \right), \quad C = -\mu_1 \mu_2 \log E.$

$$x = -\delta \frac{A - B}{A + B} = -\delta \frac{\mu_2 - \mu_1 \log \left(\frac{100 + Z}{100} \right)}{\mu_2 + \mu_1 \log \left(\frac{100 + Z}{100} \right)}, \quad y = \frac{-C}{A + B}.$$

Рекомендуемые масштабы: $\mu_1 = 10 \text{ см}, \quad \mu_2 = 0,5 \text{ см}, \quad \delta = 3 \text{ см}.$

3. Мощность силовой установки.

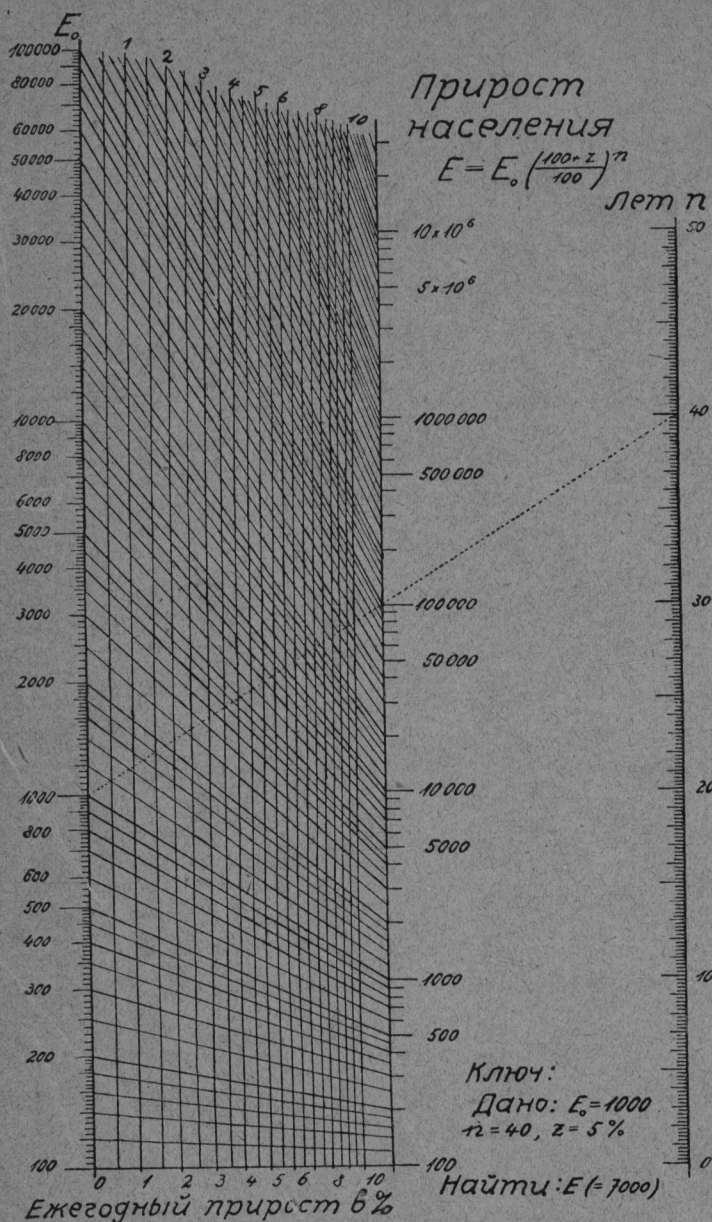
Мощность силовой установки при напоре H , расходе $Q \text{ м}^3/\text{сек}^{-1}$ и коэффициенте полезного действия η определяется по формулам:

$$KW = \frac{1000}{102} \eta QH = 9,8 QH \dots (118)$$

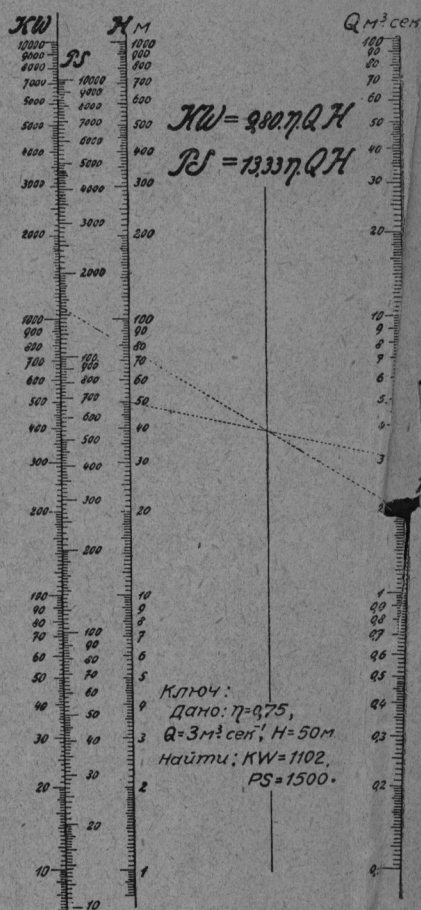
$$PS = \frac{1000}{75} \eta QH = 13,33 \eta QH \dots (119)$$

или

На черт. 45 даны их номограммы.



Черт. 44.



Черт. 45.

Построение номограммы.

Введением вспомогательного переменного и логарифмированием обе формулы сводятся к уравнениям типа I.

Рекомендуемые масштабы: все равные, по 10 см.