

МАТЕРИАЛЫ

по иссл. Р. ВОРХОВА

17т

R $\frac{152}{13}$

В.17

R $\frac{152}{13}$

В. С. Н. Х.

Промбюро Северо-Западной Области.

Строительство Государственной Волховской
Гидроэлектрической Силовой Установки.

Материалы по исследованию реки Волхова и его бассейна.

Под редакцией Начальника Отдела Водного Хозяйства и Отчуждений
инженера В. М. Родевича.

Выпуск XVII.

Инж. Н. М. Бернадский.

Теория и расчет речного паводка с применением их к суточному
регулированию реки Волхова.

Издания Строительства Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки.

Вышли и поступили в продажу следующие издания:

- ЦЕНЫ:
(без
пересылки)
- 1) №№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 Бюллетеней Волховской Гидроэлектрической Станции. Цена за номер по . 2 р. — к.
- 2) Материалы по исследованию р. Волхова и его бассейна:
- Выпуск I. Инженер *Вальман, В. Н.* — Обзор уровней р. Волхова. Инженеры *Бернадские, Н. М. и В. М.* — Вскрытие и замерзание р. Волхова за период 1881 — 1921 г.г., с 26 графиками и чертежами и 8 таблицами уровней. 217 стр., 1924 г. 6 р. 50 к.
- Выпуск II. Проф. *Черномский, В. И.* — О лотках и каналах прямоугольного сечения усиленной шероховатости в применении к рыбоходам, плотходам, быстротокам и взводному судоходству. 31 стр. с 6 таблицами чертежей. 1924 г. 1 р. 50 к.
- Выпуск III. *Домрачев, П. Ф.* — Задачи и программа рыбохоз. исследований. *Ею же* — Промысел и биология волховского сига. *Правдин, И. Ф.* — Биометрич. характеристика волховского сига. *Домрачев, П. Ф.* — Предварительный отчет по исследованию 1923 г. Инженер *Воронецкий, В. А.* — Описание рыбохода при Волховской Гидроэлектрической Установке. 183 стр. с 4 таблицами и рисунками и 6 чертежей рыбохода. 1924 г. 2 р. 50 к.
- Выпуск IV. Проф. *Прасолов, Л. И.*, проф. *Ганешин, С. С.* и *Ануфриев, Г. И.* — Почвенные и ботанические исследования по берегам р. Волхова и озера Ильмень (предварительный отчет). 99 стр., с 11 табл. приложений. 1925 г. 3 р. 50 к.

В. С. Н. Х.

Промбюро Северо-Западной Области.

Строительство Государственной Волховской
Гидроэлектрической Силовой Установки.

Материалы
по исследованию реки Волхова
и его бассейна.

—

Под редакцией Начальника Отдела Водного Хозяйства и Отчуждений
инженера В. М. Родевича.

Выпуск XVII.

Инж. Н. М. Бернадский.



Теория и расчет речного паводка с применением их к суточному
регулированию реки Волхова.

Типография „Авиоиздательства“, Ленинград, Коломенская ул., 43.

Ленинградский Гублит № 29355.

Тираж 1000 экз.

О г л а в л е н и е.

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5—9
Общая теория речного паводка:	
Координация	10
Движение расхода постоянной величины	10—12
Элементы водного зеркала реки	12—15
Условие неразрывности	15—16
Круг неразрывности	17—18
Ускорение массы элементарного профиля	18—20
Условие равновесия	20—22
Скорость распространения возмущения	22—24
Графический расчет речного паводка:	
Условие равновесия	24—26
Условие неразрывности	26—28
Принципы расчета паводка	28—31
Ход расчета паводка	31—32
Проект суточного регулирования реки Волхова	33—37
Заключение	38
Описание хода расчета суточного регулирования	39—48
Замеченные опечатки	49
Чертежи.	

ПРЕДИСЛОВИЕ.

По почину Отдела Водного Хозяйства Волховского Строительства, задача суточного регулирования расхода воды на Волховской Гидроэлектрической Станции, в отношении его возможности и влияния на подпертый режим Волхова, обоснована теоретически и рассчитана графически инженером-гидрологом Н. М. Бернадским.

Интересное и изящное разрешение задачи расчета и построения суточного регулирования, найденное Н. М. Бернадским, Отдел Водного Хозяйства издает в печати, считая его одним из способов к решению вопроса регулирования расхода реки.

Труд Н. М. Бернадского, проверенный в Отделе Водного Хозяйства, дает для Волховской Установки практический и положительный ответ на вопрос о возможности и успешности применения на Волхове суточного регулирования, о схеме его производства и о его последствиях в отношении судоходных глубин и скоростей.

Отдел Водного Хозяйства имеет надежду, что может быть удастся на особом опыте изменения расходов воды на р. Волхове проверить на деле построения и расчеты предлагаемого труда.

Начальник Отдела Водного Хозяйства
Волховского Строительства Инженер *В. Родевич.*

1926 г. Ноябрь.

Ленинград.

ВВЕДЕНИЕ.

Меняющаяся в течение суток бытовая потребность в электроэнергии диктует при эксплуатации гидроэлектрической станции прибегать к суточному регулированию стока реки. Регулирование это достигается за счет срабатывания верхнего бьефа установки в течение периода дня с большим спросом энергии и восстановлением сработанного слоя в остальную часть суток, при чем суточное потребление воды должно быть не больше суточного дебета реки. Предел понижения горизонта воды верхнего бьефа определяется, с одной стороны, конструктивными особенностями гидроэлектрической станции и экономикой ее работы, с другой,— на судоходных и сплавных реках минимальными глубинами, требующимися по техническим условиям сплава и судоходства. На Волхове в этом отношении ставят предел возможному понижению глубин Пчевские его пороги и начало Петропавловских порогов, которые должны быть перекрыты подпором от плотины на достаточную для судоходства глубину.

Таким образом, для установления возможного предела суточного регулирования чрезвычайно важным является выяснение мгновенных профилей водной поверхности реки, на основании которых и возможно только установить, насколько гидроэлектрическая станция фактически может выполнять требуемый график нагрузки.

Необходимость применения суточного регулирования на р. Волхове подробно мотивирована в вып. XXII „Материалов по исследованию р. Волхова“.

Подробный обзор всех до сих пор предложенных методов расчета колебаний верхнего бьефа при неустановившемся режиме приведен в статье проф. И. В. Егiazарова в выпуске № 7 Известий Научно-Мелиорационного Института—1924 года и там же дано описание предложенного проф. Егiazаровым метода расчета в применении к расчету суточного регулирования стока реки Волхова.

Все эти методы позволяют построить мгновенные профили поверхности реки лишь приближенно, при чем основные условия гидродинамики: условие неразрывности и условие равновесия— для любого участка реки не соблюдаются.

Печатаемые ниже теория и расчет речного паводка, разработанные, по поручению Отдела Водного Хозяйства Волховстроя, инженером Н. М. Бернадским, представляют чрезвычайно большой интерес для исследования вопросов суточного регулирования.

На основании условия равновесия любого участка реки инж. Н. М. Бернадский приходит к уравнению неустановившегося течения ¹⁾. Пользуясь выражениями для неустановившегося и равномерного установившегося движений автор выводит уравнение для определения дополнительного падения на участке, необходимого для прохода паводка. Этому уравнению придается следующий вид:

$$\delta = aQ^2 - a_0Q_0^2 + bq \dots \dots \dots (1)$$

где:

$$a = \frac{cL}{RF^2}$$

$$b = \frac{L}{3600gF}$$

c —удельное сопротивление,

Q —расход паводка,

Q_0 —расход установившегося течения реки до наступления паводка,

q —часовое приращение расхода,

L —длина рассматриваемого участка реки,

R —гидравлический радиус (средний для участка),

F —площадь живого сечения (средняя для участка),

δ —дополнительное падение на участке, необходимое для прохода паводка,

g —ускорение силы тяжести.

Из условия неразрывности:

$$wh = S_2 - S_1 \dots \dots \dots (2)$$

где:

w —площадь зеркала участка,

¹⁾ В курсах гидравлики уравнение неустановившегося медленно изменяющегося одномерного движения жидкости дается в следующем виде:

$$i = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\alpha V^2}{2g} \right) + \frac{d}{ds} (hw) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

h —изменение горизонта воды при проходе паводка,

S_2 —избыточный над нормальным суммарный приток воды в рассматриваемый участок.

S_1 —избыточный над нормальным суммарный расход воды из рассматриваемого участка.

Для упрощения расчетов инж. Н. М. Бернадский принимает, что изменение горизонта воды не оказывает значительное влияние на величину „а“, вследствие чего уравнению (1) придается вид

$$\delta = a(Q^2 - Q_0^2) + bq \dots \dots \dots (1\text{-бис})$$

Практическая правильность такого упрощения подтверждается тем обстоятельством, что отношение изменения высоты горизонта к глубине реки (гидравлическому радиусу) при суточном регулировании очень незначительно и обычно не превосходит 5%. Действительно, полагая $F = lR$, где l —средняя ширина реки, которую в пределах суточного колебания горизонта можно считать постоянной, равенство (1) может быть представлено:

$$\delta = a \left(\left[\frac{1}{1 \pm \frac{h}{R}} \right]^3 Q^2 - Q_0^2 \right) + bq$$

$$a(xQ)^2 - (Q_0^2) + bq, \text{ где } x^2 = \left[\frac{1}{1 \pm \frac{h}{R}} \right]^3$$

При указанных выше данных $0,93 \leq x \leq 1,08$ и, следовательно, величина регулируемого расхода должна быть увеличена или уменьшена на максимум 7%, т. е. на величину, которая вообще отвечает точности определения расхода.

При составлении проекта суточного регулирования для Волхова инж. Н. М. Бернадский в своих вычислениях пренебрегает влиянием инерции, т. е. отбрасывает второй член равенства (1) и переходит тем самым к пользованию уравнением Шези. Самый процесс вычислений при этом остается тот же, отпадает необходимость лишь в построении простого графика дополнительных падений, зависящих от инерции.

Для выяснения величины возможной ошибки от этого упрощения преобразуем формулу (1) следующим образом:

$$\delta = a(Q^2 - Q_0^2) + bq = a(Q^2 - Q_0^2) \left[1 + \frac{bq}{a(Q^2 - Q_0^2)} \right] \dots \dots (3)$$

Обозначим часовое приращение расхода по отношению к бытовому расходу $q = \beta Q_0$ и число часов, в течение которых

происходит приращение расхода, через n , тогда $Q = Q_0 + n\beta Q_0 = Q_0(1 + n\beta)$ и равенство (3) переписывается:

$$\delta = a(Q^2 - Q_0^2) \left[1 + \frac{bq}{3600gc} \cdot \frac{1}{Q_0 n(2 + \beta n)} \right] \quad (3\text{-бис})$$

Величина ошибки k определяется вторым слагаемым в квадратных скобках равенства (3-бис) и для случая р. Волхова при $Q_0 = 136 \text{ м}^3/\text{с}$. значения этой ошибки для отдельных участков следующие:

у плотины: $n = 2$; $\beta = 0,97$; $l = 360$; $a = 0,541 \times 10^{-6}$; $R = 9,62$; $L = 6000$ метр.

$$k = \frac{lR^2}{3600gc} \times \frac{1}{Q_0 n(2 + \beta n)} = \frac{L \times 10^{-3}}{35,3 \times a l R} \times \frac{1}{Q_0 n(2 + \beta n)} = 0,085$$

участок у Гостинополя: для первых двух часов ($n = 2$); $\beta = 0,103$;

$l = 300$; $R = 4,0$; $a = 0,649 \times 10^{-6}$; $L = 6000$ метр.; $k = 0,345$.

для последующих 5 часов ($n = 5$), $\beta = 0,062$ и, следовательно $k = 0,132$.

У Пчевских порогов в течение первых двух часов ($n = 2$) $\beta = 0,167$; $l = 340$; $L = 6000$ метр.; $a = 3,46 \times 10^{-6}$; $k = 0,072$.

Как видно из приведенных подсчетов в условиях р. Волхова влиянием инерции в практических подсчетах вполне возможно пренебречь. Специальные построения, исполненные для суточного регулирования расхода в 136 куб. метр./сек. с учетом инерции показали, что результаты получаются почти что совпадающими с таковыми же, при которых влияние инерции не учитывается. Ошибка не превосходит 5%, что для таких расчетов может считаться практическим пределом точности.

Заслуживает внимания полученная в результате расчетов кривая регулированных расходов. Кривая эта, начиная со вторых суток, имеет характер замкнутого контура. Несомкнутость кривой расхода в течение первых суток показывает, что суточное регулирование вызывает возмущения в реке, вследствие чего к концу первых суток характер распределения расходов по длине реки меняется по сравнению с естественным, и это распределение остается для всех последующих суток, если только регулирование происходит ежедневно.

Наглядное представление о распределении расходов по длине реки дают графики контуров расходов. Восстановление бьефа происходит постепенно параллельными слоями, вследствие чего к концу суток наблюдается перелив воды через плотину, что

показывает, что суточное регулирование при принятых в основу расчета данных, вызывает некоторую потерю воды. Для случая расхода 136 куб. метр./сек. и заданного графика регулирования перелив происходит в течение ∞ 8 час., при чем всего переливается \approx 418000 куб. метр., что составляет потерю \approx 3,5%.

Приведем также для сравнения полученные по различным методам величины понижения уровня воды у плотины (для расхода 136 метр.³/сек.) и наименьшие глубины на Петропавловских порогах.

Наименование пунктов.	Отм. г. воды на плот. без сут. регул.	Отм. наин. гор. воды при сут. рег.			Наиб. пон. ур. воды в метр.			Кол. заим. из бьефа воды в милл. в. м.		
		По Бернадск.	По Египазарову.	По Риттеру.	По Бернадск.	По Египазарову.	По Риттеру.	По Бернадск.	По Египазарову.	По Риттеру.
Плотина	15,77	15,18	15,28	15,45	0,59	0,49	0,35	6,8	5,76	7,8
Гребень Петропавловских порогов . .	15,78	15,23	15,33	—	0,55	0,43	—	—	—	—
Глубина на порогах в метрах	2,23	1,68	1,78	—	—	—	—	—	—	—

Как усматривается из таблицы, подсчеты по методу инж. Бернадского приводят к несколько большему понижению уровня, чем по другим методам.

В заключение необходимо отметить, что изложенный ниже метод расчета мгновенных профилей при проходе паводка (суточное регулирование) заслуживает внимания и что простота и наглядность предлагаемого способа вычислений делают его удобным в практическом применении.

Инженер Г. Лоттер.

Общая теория речного паводка.

1. Координация.

Направим ось X —горизонтально, по направлению течения реки; ось Y —вертикально, по направлению действия силы тяжести. Тогда будем иметь: x —абсцисса поперечного сечения реки; y —ордината уровня воды.

Принятая система координат удобна для решения вопросов теоретического характера, так как дает возможность выражать положительными числами важнейшие механические элементы речного режима: ускорение силы тяжести; скорость течения и уклон на равномерном участке реки.

При переходе к практической системе координат—„отметкам“ и „пикетажу“,—направление обеих осей меняется в прямо противоположную сторону. Уклон на равномерном участке реки остается, по-прежнему, положительным.

Вычисление практических координат X и H может быть выполнено на основании нижеследующих переходных формул:

$$X = X_0 - x \dots \dots \dots (1)$$

$$H = H_0 - y \dots \dots \dots (2)$$

где X_0 и H_0 —пикет и отметка теоретического начала координат, а X и H —пикет и отметка любой текущей точки продольного речного профиля. За начало пикетажа принимается устье реки; за начало отметок—уровень моря.

2. Движение расхода постоянной величины.

В условиях паводка расход реки Q есть функция абсциссы x и времени t .

$$Q = f(x, t) \dots \dots \dots (3)$$

Полагая в равенстве (3) $x = x_0 = \text{const.}$, имеем:

$$Q = f(x_0, t) \dots \dots \dots (4)$$

т. е. для постоянного сечения реки, расход Q есть функция времени t . Выражая эту функцию геометрически, мы получаем график, который условимся именовать „графиком питания“ реки в данном ее сечении.

Полагая в том же равенстве (3) $t = t_0 = \text{const.}$, получаем:

$$Q = f(x, t_0) \dots \dots \dots (5)$$

т. е. для постоянного момента времени t_0 , расход Q есть функция абсциссы x . Выражая эту функцию геометрически, получаем график, который условимся именовать „мгновенным контуром расхода“ в рассматриваемый момент времени.

Зададимся целью найти такую зависимость между координатами x и t , для которой, расход Q , несмотря на свою общую изменчивость, оставался бы постоянным и был бы равен заданному значению

$$Q = Q_0 = \text{const.} \dots \dots \dots (6)$$

Интересующая нас зависимость, связывающая координаты x и t есть, очевидно, закон какого-то движения. Движущимся объектом этого закона является заданный нам, постоянный расход Q_0 . Выражая искомое движение в общей дифференциальной форме, можем написать:

$$\frac{dx}{dt} = \Theta \dots \dots \dots (7)$$

где dx —есть перемещение вдоль реки заданного постоянного расхода Q_0 за промежуток времени dt , а Θ —скорость искомого движения, которую мы будем называть „скоростью распространения расхода постоянной величины“ или, просто, „скоростью расхода“.

Определение скорости Θ основано на совместном решении уравнений (3) и (6) с предварительным их дифференцированием.

Дифференцируя указанные уравнения, получаем:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} dx + \frac{\partial Q}{\partial t} dt \dots \dots \dots (8)$$

$$dQ = 0 \dots \dots \dots (9)$$

Исключая из (8) и (9) дифференциал dQ , и, разделяя обе части на dt , можем написать:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (10)$$

Исключая из (7) и (10) производную $\frac{dx}{dt}$ находим:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -H \frac{\partial Q}{\partial x} \dots \dots \dots (11)$$

откуда и определяем интересующую нас скорость расхода H .

$$H = - \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{\frac{\partial Q}{\partial x}} \dots \dots \dots (12)$$

Из формулы (12) видно, что скорость расхода есть взятое с обратным знаком отношение наклонов двух графиков: графика питания и мгновенного контура расхода.

3. Элементы водного зеркала реки.

Водное зеркало реки, в условиях паводка, никогда не находится в покое. Ордината уровня воды „у“ есть функция абсциссы x и времени t .

$$y = \varphi (x, t) \dots \dots \dots (13)$$

Полагая в равенстве (13) $x = x_0 = \text{const}$, имеем:

$$y = \varphi (x_0, t) \dots \dots \dots (14)$$

т. е. для постоянного сечения реки x_0 , ордината уровня воды „у“ есть функция времени t . Выражая эту функцию геометрически, получаем график, который условимся именовать „водомерным графиком“ на данном профиле реки.

Полагая в том же равенстве (13) $t = t_0 = \text{const}$., имеем:

$$y = \varphi (x, t_0) \dots \dots \dots (15)$$

т. е. для постоянного момента времени t_0 , ордината уровня воды „у“ есть функция абсциссы x . Выражая эту функцию геометрически, получаем график, который условимся именовать „графиком мгновенного уровня реки“ в рассматриваемый момент времени.

Изменение ординаты „у“ тесно связано с изменением расхода Q . Сопоставляя между собою обе величины, можно составить зависимость между Q и „у“ в двух различных предположениях: при $x = \text{const}$. и при $t = \text{const}$.

Полагая $x = x_0 = \text{const}$., можем написать:

$$Q = P_1 (y) \dots \dots \dots (16)$$

Геометрическое изображение этой функции имеет вид некоторой кривой, которую мы будем называть „кривой расхода“ в данном пункте реки.

Полагая $t = t_0 = \text{const.}$, можем написать:

$$Q = P_2(y) \dots \dots \dots (17)$$

Геометрическое изображение этой функции также имеет вид некоторой кривой, которую мы будем называть „нитью расхода“ для данного момента времени.

Наклон элемента „кривой расхода“ к оси „y“ мы будем обозначать символом $\frac{\partial Q}{\partial y}$; наклон элемента „нити расхода“ к той же оси—символом $\frac{\delta Q}{\delta y}$.

Дифференцируя (13) по x и t через посредство промежуточной переменной Q , приходим к нижеследующим равенствам:

При $x = x_0 = \text{const.}$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial x} : \frac{\partial Q}{\partial y} \dots \dots \dots (18)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} : \frac{\partial Q}{\partial y} \dots \dots \dots (19)$$

При $t = t_0 = \text{const.}$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\delta y}{\delta Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial x} : \frac{\delta Q}{\delta y} \dots \dots \dots (20)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\delta y}{\delta Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} : \frac{\delta Q}{\delta y} \dots \dots \dots (21)$$

Приступая к анализу выведенных формул, заметим, что дифференциал ∂y , написанный в предположении $x = \text{const.}$, является перемещением уровня воды во времени; тот же дифференциал, написанный в предположении $t = \text{const.}$, является падением реки на протяжении некоторой ее длины. В первом случае рассматриваемый дифференциал является исключительной принадлежностью паводка; во втором случае—общей принадлежностью речного режима в целом. Имея в виду указанные свойства дифференциала ∂y , рассмотрим каждую из формул в отдельности.

Производная $\frac{\partial y}{\partial x}$ равенства (18), отнесенная к случаю $x = \text{const.}$, заслуживает названия „добавочного уклона паводка“, т. к. будучи, по смыслу размерности, уклоном, она является исклю-

чительной принадлежностью паводка. Обозначая добавочный уклон паводка буквою j , можем написать:

$$j = \frac{\frac{\partial Q}{\partial x}}{\frac{\partial Q}{\partial y}} \dots \dots \dots (22)$$

т. е. добавочный уклон паводка равен отношению наклонов двух графиков: мгновенного контура расхода и кривой расхода.

Производная $\frac{\partial y}{\partial t}$ равенства (19), отнесенная к случаю $x = \text{const.}$, является скоростью движения водного уровня реки. Обозначая эту скорость буквою W , можем написать:

$$W = \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{\frac{\partial Q}{\partial y}} \dots \dots \dots (23)$$

т. е. скорость движения водного уровня реки равна отношению наклонов двух графиков: графика питания и кривой расхода.

Производная $\frac{\partial y}{\partial x}$ равенства (20), отнесенная к случаю $t = \text{const.}$, является полным уклоном водного зеркала реки. Обозначая этот полный уклон буквою J , будем иметь:

$$J = \frac{\frac{\partial Q}{\partial x}}{\frac{\partial Q}{\partial y}} \dots \dots \dots (24)$$

т. е. полный уклон реки равен отношению наклонов двух графиков: мгновенного контура расхода и нити расхода.

Производная $\frac{\partial y}{\partial t}$ равенства (21), отнесенная к случаю $t = \text{const.}$, и взятая с обратным знаком, может быть названа „скоростью восхождения расхода“ постоянной величины. Обозначая эту скорость буквою ψ , можем написать:

$$\psi = - \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{\frac{\partial Q}{\partial y}} \dots \dots \dots (25)$$

т. е. скорость восхождения расхода постоянной величины равна взятому с обратным знаком отношению наклонов двух графиков: графика питания и нити расхода.

Принятый нами термин „скорость восхождения расхода“ оправдывается из сопоставления формул (12) и (24). Перемножая указанные формулы почленно, получаем:

$$\Theta J = - \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{\frac{\partial Q}{\partial y}} \dots \dots \dots (26)$$

Сравнивая между собой формулы (25) и (26), заключаем:

$$J = \frac{\psi}{\Theta} \dots \dots \dots (27)$$

Из формулы (27) видно, что скорость восхождения расхода и скорость распространения его суть составляющие некоторой общей скорости, совпадающей с направлением мгновенного уровня реки.

Разделяя (23) на (12) и сравнивая полученный результат с (22), получаем вторую формулу для выражения величины добавочного уклона паводка j .

$$j = - \frac{W}{\Theta} \dots \dots \dots (28)$$

Из формулы (28) видно, что добавочный уклон паводка равен взятому с обратным знаком отношению скорости движения водного уровня к скорости распространения расхода постоянной величины.

4. Условие неразрывности.

Если на концах элементарного бесприточного участка реки Δx , расходы воды разнятся между собою на величину ΔQ , то за промежуток времени Δt , в пределах участка накопится излишняя вода в количестве, равном $\Delta Q \Delta t$.

Эта излишняя вода, разливаясь равномерным слоем по всей площади выделенного элементарного зеркала, образует добавочную призму, об'ем которой равен произведению $l \Delta x \Delta y$, где l — ширина реки, а Δy — элементарное приращение высоты водного уровня. Выражая мысль аналитически, можем написать:

$$\Delta Q \Delta t = l \cdot \Delta x \cdot \Delta y \dots \dots \dots (29)$$

Разделяя обе части равенства на $\Delta x \cdot \Delta t$ и заменяя приращенные величины соответствующими частными дифференциалами, получаем:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = l \frac{\partial y}{\partial t} \dots \dots \dots (30)$$

т. е. приращение расхода реки на протяжении единицы длины бесприточного ее течения равно расходу через зеркало на протяжении той же единицы. Равенство (30) есть основная форма условия „неразрывности“ для бесприточного участка реки.

Сопоставляя (30) с (12), находим:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -lW\theta \dots \dots \dots (31)$$

т. е. приращение расхода (Q) в единицу времени равно взятому с обратным знаком об'ему, построенному на ширине реки, скорости движения уровня воды и скорости расхода. Формула (31) есть второй вид основного условия неразрывности.

Сопоставляя (31) с (23), приходим к третьей форме условия неразрывности.

$$\frac{\partial Q}{\partial y} = -l\theta \dots \dots \dots (32)$$

т. к. наклон кривой расхода к оси Y равен взятому с обратным знаком произведению ширины реки на скорость расхода.

Графический смысл условия неразрывности может быть выяснен на основании нижеследующих рассуждений.

Представим себе график мгновенных уровней реки [YX], на котором проведены два смежных уровня воды для соседних моментов времени t_1 и t_2 и две смежные ординаты для соседних пунктов реки x_1 и x_2 . Элементарная площадка графика, ограниченная двумя парами нанесенных линий, будет равна:

$$\Delta P_y = \Delta y \cdot \Delta x \dots \dots \dots (33)$$

Представим себе график питания [QT], на котором проведены два смежных криволинейных обвода для двух соседних пунктов реки x_1 , и x_2 и две смежные ординаты для двух соседних моментов времени t_1 и t_2 . Элементарная площадка графика, ограниченная двумя парами проведенных линий, будет равна:

$$\Delta P_Q = \Delta Q \cdot \Delta t \dots \dots \dots (34)$$

Сопоставляя равенства (33) и (34) с исходным равенством (29), находим:

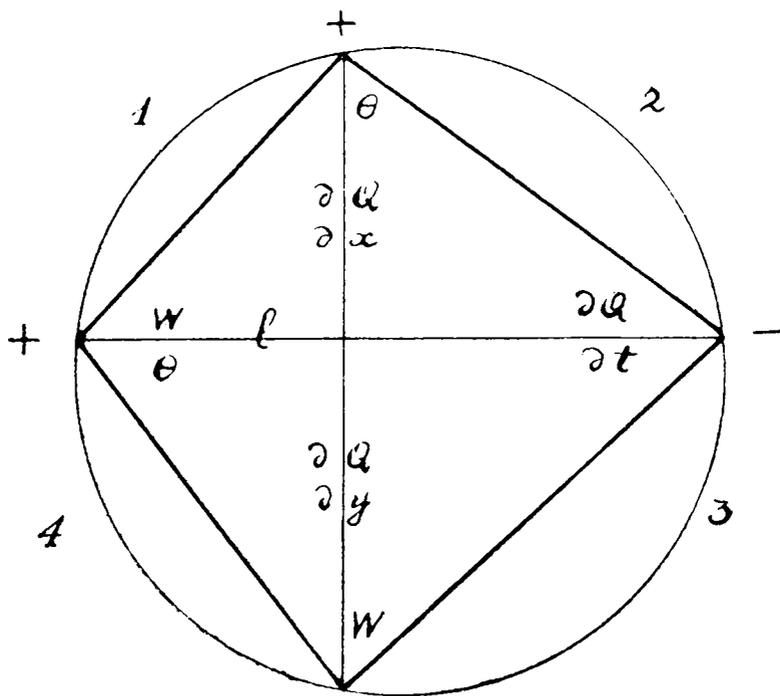
$$\Delta P_Q = l \cdot \Delta P_y \dots \dots \dots (35)$$

т. е. элементарная площадка графика питания равна произведению ширины реки на соответствующую элементарную площадку графика мгновенных уровней реки.

5. Круг неразрывности.

Все выведенные нами аналитические зависимости, так или иначе, связанные с условием неразрывности, легко укладываются в геометрическую схему, носящую название „круга неразрывности“. (Фиг. 1).

Откладывая величины l , $\frac{\partial Q}{\partial x}$, $\frac{\partial Q}{\partial t}$, $\frac{\partial Q}{\partial y}$ от общей точки по четырем взаимно перпендикулярным направлениям, и, соединяя концы отложений прямыми линиями, получаем замкнутый поли-



Фиг. 1

гон, обладающий свойствами вписанного четырехугольника. Свойство это вытекает, как следствие, из того факта, что углы, опирающиеся на одну и ту же сторону четырехугольника, измеряются одними и теми же тангенсами, численно равными скоростям W и v . Присваивая диагоналям четырехугольника алгебраические знаки, как это показано на чертеже, воспользуемся „кругом неразрывности“ для наглядного вывода предыдущих формул.

Рассматривая квадрант 1, находим основное условие неразрывности (30).

$$lW = \frac{\partial Q}{\partial x} \dots \dots \dots (36)$$

Из квадранта 2 получаем закон движения расхода постоянной величины (12)

$$\Leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} = - \frac{\partial Q}{\partial t} \dots \dots \dots (37)$$

Из квадранта 3 находим закон движения уровня воды (23)

$$W \frac{\partial Q}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial t} \dots \dots \dots (38)$$

Из квадранта 4 определяем третью форму условия неразрывности (32)

$$l \Theta = - \frac{\partial Q}{\partial y} \dots \dots \dots (39)$$

Рассматривая любую из фигур, расположенных по одну сторону горизонтальной диагонали, получаем вторую форму условия неразрывности (31)

$$l W \Theta = - \frac{\partial Q}{\partial t} \dots \dots \dots (40)$$

Рассматривая любую из фигур, расположенных по одну сторону вертикальной диагонали, находим выражение для добавочного уклона паводка (28)

$$j = - \frac{W}{\Theta} \dots \dots \dots (41)$$

Круг неразрывности, являясь наглядным пособием для определения соотношений между отдельными элементами паводка, может служить также и для графического их построения.

6. Ускорение массы элементарного профиля.

Выделим из реки элементарный поперечный слой воды с продольным размером ΔL и обозначим: F —живая площадь; l —ширина реки; R —средняя глубина, принимаемая за подводный радиус, v —средняя скорость течения.

Под влиянием действующих на элементарный профиль внешних сил, масса профиля получает ускорение, имеющее вид полной производной от средней скорости v по времени t . Представляя полную производную, как сумму частных ее слагаемых, будем иметь:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} \dots \dots \dots (42)$$

Входящий в формулу (42) дифференциал dx есть перемещение центра массы профиля за промежуток времени dt . Составляя отношение обоих указанных дифференциалов, получаем величину средней скорости течения.

$$v = \frac{dx}{dt} \dots \dots \dots (43)$$

Решая совместно (42) и (43), находим

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \dots \dots \dots (44)$$

Выражая среднюю скорость течения в форме отношения расхода Q к живой площади F , можем написать:

$$v = \frac{Q}{F} \dots \dots \dots (45)$$

Дифференцируя написанное отношение по переменным x и t будем иметь:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{F^2} \left[F \frac{\partial Q}{\partial x} - Q \frac{\partial F}{\partial x} \right] \dots \dots \dots (46)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{F^2} \left[F \frac{\partial Q}{\partial t} - Q \frac{\partial F}{\partial t} \right] \dots \dots \dots (47)$$

Подставляя полученные величины в формулу полного ускорения (42), напомним:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{F} \left[v \frac{\partial Q}{\partial x} - v^2 \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} - v \frac{\partial F}{\partial t} \right] \dots \dots (48)$$

При непрерывном изменении уровня воды, живая площадь F есть функция ординаты „ y “ а эта последняя—функция времени t . Составляя частную производную от F по t , будем иметь (при $x = \text{const.}$):

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} = W \cdot \frac{\partial F}{\partial y} \dots \dots \dots (49)$$

При увеличении ординаты „ y “ на величину dy , живая площадь F уменьшается на величину площади $l dy$. Выражая эту мысль аналитически, будем иметь:

$$dF = -l dy \dots \dots \dots (50)$$

Разделяя обе части равенства на dy и, имея ввиду условие $x = \text{const.}$, можем написать:

$$\frac{\partial F}{\partial y} = -l \dots \dots \dots (51)$$

Подставляя (51) в (49), находим:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = -lW \dots \dots \dots (52)$$

Сравнивая найденное равенство (52) с общим условием неразрывности (36), получаем:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = - \frac{\partial Q}{\partial x} \dots \dots \dots (53)$$

Подставляя (53) в (48), имеем:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{F} \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + 2v \frac{\partial Q}{\partial x} - v^2 \frac{\partial F}{\partial x} \right] \dots \dots \dots (54)$$

Обозначая через y_0 ординат соединить среднего дна, можем выразить величину живой площади нижеследующим образом:

$$F = l (y_0 - y) \dots \dots \dots (55)$$

Дифференцируя (55) по x , и полагая $l = \text{const}$ получаем:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = l \left[\frac{\partial y_0}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} \right] = l(J' - J) \dots \dots \dots (56)$$

где J — уклон поверхности реки, а J' — уклон дна.

Принимая во внимание (36), (40) и (56), переписываем формулу (54) в окончательном виде:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{R} \left[v^2 (J - J') + W (2v - H) \right] \dots \dots \dots (57)$$

где R — средняя глубина реки.

7. Условие равновесия.

Выделим внутри водной массы реки элементарный кубик с ребрами, равными единице длины и вообразим подошву этого кубика, поставленную горизонтально, для того, чтобы, под влиянием собственной тяжести, он не смог бы соскальзывать по наклонной плоскости. Ориентируем кубик так, чтобы две боковые его грани были бы касательными к течению, а грани „верховая“ и „низовая“ — расположились бы нормально к нему.

Давления воды на боковые грани кубика будут совершенно одинаковы, т. е. обе эти грани расположены на одинаковой глубине под поверхностью водного уровня реки. Давления воды

на грани, нормальные к течению, не могут быть одинаковыми, т. к. грань „верховая“ имеет над собой высоту воды большую, нежели грань „низовая“. Разность этих высот будет численно равна уклону реки, т. к. расстояние между противоположными гранями кубика равно, по условию, единице длины. Указанная разность высот обуславливает собою соответствующую разность давлений, т. е. силу, под влиянием которой, водный кубик и движется вдоль реки, образуя течение последней. Обозначая буквою γ — вес кубической единицы воды, находим, что интересующая нас разность давлений будет равна произведению γJ .

Сила γJ , движущая элементарный кубик, не зависит, как видно из ее выражения, от глубины кубика под поверхностью воды и остается постоянной для всех кубиков, слагающих одно и то же поперечное сечение реки.

Выделяя из реки, на протяжении единицы ее длины, поперечный слой воды с площадью живого сечения F , находим величину приложенной к этому слою движущей силы. Искомая сила, пропорциональная числу слагающих ее сил элементарных, будет равна

$$\gamma J \bullet F = \gamma F J \dots \dots \dots (58)$$

Из формулы (58) видно, что знак движущей силы совпадает со знаком уклона реки, т. е. что движущая сила всегда направлена в сторону речного падения.

Выделенный нами элементарный поперечный слой воды, двигаясь вдоль реки, встречает со стороны речного ложа ряд непосредственных и косвенных сопротивлений, соединяемых под общим термином „гидравлического сопротивления реки“.

Величина гидравлического сопротивления может быть найдена на основании нижеследующих, установленных опытом, положений:

1⁰ Гидравлическое сопротивление пропорционально смоченной площади русла $l \cdot 1 = l$, где l — ширина реки, принимаемая за подводный периметр.

2⁰ Гидравлическое сопротивление пропорционально некоторой степени средней скорости течения v^n и направлено против этой скорости. Для удовлетворения последнему условию, следует рассматривать показатель n , как предел дроби с обоими нечетными членами.

3⁰ Гидравлическое сопротивление, действующее на единице площади русла при средней скорости, равной единице, опреде-

ляется непосредственным опытом и носит название „удельного сопротивления“. Удельное сопротивление обозначается буквою „с“ и измеряется в единицах веса, отнесенного к единице площади.

На основании перечисленных положений, определяем действующую на выделенный нами слой, силу гидравлического сопротивления.

$$- c \cdot l \cdot l \left[\frac{v \text{ един. скор.}}{1 \text{ един. скор.}} \right]^n = - c l v^n \dots \dots (59)$$

Движущая сила $\frac{\gamma F J}{g}$ и сила сопротивления $- c l v^n$, будучи приложены к выделенному нами слою воды, дают равнодействующую, равную алгебраической их сумме.

$$\frac{\gamma F J}{g} - c l v^n \dots \dots \dots (60)$$

Под влиянием найденной равнодействующей, масса выделенного слоя ($\gamma F : g$) будет развивать ускорение того же знака, как и сама равнодействующая.

$$\frac{\gamma F}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{\gamma F J}{g} - c l v^n \dots \dots \dots (61)$$

Это и есть искомое нами условие равновесия.

Полагая в (61) $v = Q : F$ и, разделяя обе части на γF , получаем:

$$J = \frac{c Q^n}{\gamma R F^n} + \frac{1}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \dots \dots \dots (62)$$

Заменяя производную $\frac{dv}{dt}$ ее значением из (57), имеем окончательно:

$$J = \frac{c Q^n}{\gamma R F^n} + \frac{1}{gR} \left[v^2 (J - J') + W (2v - H) \right] \dots \dots (63)$$

8. Скорость распространения возмущения.

Применяя общую формулу уклона (63) к случаю течения установившегося, полагаем там $W = 0$.

$$J_0 = \frac{c Q_0^n}{\gamma R F^n} + \frac{1}{gR} v_0^2 (J_0 - J') \dots \dots \dots (64)$$

где I_0, v_0, Q_0 — соответствующие элементы течения установившегося. Вычитая (64) из (63), имеем:

$$J - J_0 = \frac{c(Q^n - Q_0^n)}{\gamma R F^n} + \frac{1}{gR} \left[v^2(J - J') - v_0^2(J_0 - J') + W(2v - \Theta) \right] \quad (65)$$

Граница распространения возмущения совпадает с точкой выклинивания мгновенного контура расхода, для которой имеем: $Q = Q_0$ и $V = V_0$. Скорость расхода Θ приобретает для этой точки значение скорости распространения возмущения Θ_0 . Преобразуя соответствующим образом (65), находим:

$$J - J_0 = \frac{1}{gR} [V^2 (J - J_0) + W(2V - \Theta_0)] \dots \dots \dots (66)$$

Полный уклон реки J может быть выражен, как сумма уклона установившегося течения J_0 и добавочного уклона паводка j

$$J = J_0 + j \dots \dots \dots (67)$$

откуда находим:

$$J - J_0 = j \dots \dots \dots (68)$$

Решая (68) совместно с (41), находим:

$$J - J_0 = - \frac{W}{\Theta} \dots \dots \dots (69)$$

Подставляя (69) в (66), получаем:

$$- \frac{W}{\Theta_0} = \frac{1}{gR} \left[V^2 \left(- \frac{W}{\Theta_0} \right) + W(2V - \Theta_0) \right] \dots \dots \dots (70)$$

Сокращая обе части (70) на W и, делая несложные преобразования, приходим к уравнению:

$$\Theta_0^2 - 2\Theta_0 V + V^2 = gR \dots \dots \dots (71)$$

Отсюда и определяем интересующую нас скорость распространения возмущения:

$$\Theta_0 = V \pm \sqrt{gR} \dots \dots \dots (72)$$

где Θ_0 — скорость распространения возмущения; V — средняя скорость течения реки; R — средняя глубина реки; g — ускорение силы тяжести.

Правая часть равенства (72) есть функция абсциссы x . Полагая $\Theta_0 = \frac{dx}{dt}$ и, производя соответствующее интегрирование,

находим время t в течение которого граница паводка пройдет расстояние x . Искомое время t будет равно

$$t = \int_0^x \frac{dx}{V \pm \sqrt{gR}} \dots \dots \dots (73)$$

Графический расчет речного паводка.

9. Условие равновесия.

При расчете речного паводка мы будем принимать во внимание лишь ту часть силы инерции, которая зависит от изменения расхода во времени.

Заменяя в равенстве (63) скорость Θ ее значением из (40) и, пренебрегая прочими составляющими силы инерции, получаем:

$$J = \frac{cQ^n}{\gamma R F^n} + \frac{1}{gF} \frac{\partial Q}{\partial t} \dots \dots \dots (74)$$

Подразделяя реку на участки с равномерным уклоном поверхности, назовем: L —расчетная длина участка; Δ —падение уровня воды на протяжении этой длины. Тогда будем иметь:

$$J = \frac{\Delta}{L} \dots \dots \dots (75)$$

Подставляя (75) в (74) и, полагая $\gamma = 1$ и $n = 2$, находим:

$$\Delta = \frac{cL}{RF^2} Q^2 + \frac{L}{gF} \frac{\partial Q}{\partial t} \dots \dots \dots (76)$$

где величины Q и $\frac{\partial Q}{\partial t}$ имеют средние значения для рассматриваемого протяжения L .

Называя буквою q —часовое приращение величины расхода Q , перепишем равенство (76) в новом виде:

$$\Delta = \frac{cL}{RF^2} \cdot Q^2 + \frac{L}{3600 gF} \cdot q \dots \dots \dots (77)$$

Вводя обозначения:

$$a = \frac{cL}{RF^2} \dots \dots \dots (78)$$

$$b = \frac{L}{3600 gF} \dots \dots \dots (79)$$

напишем окончательное выражение для условия равновесия:

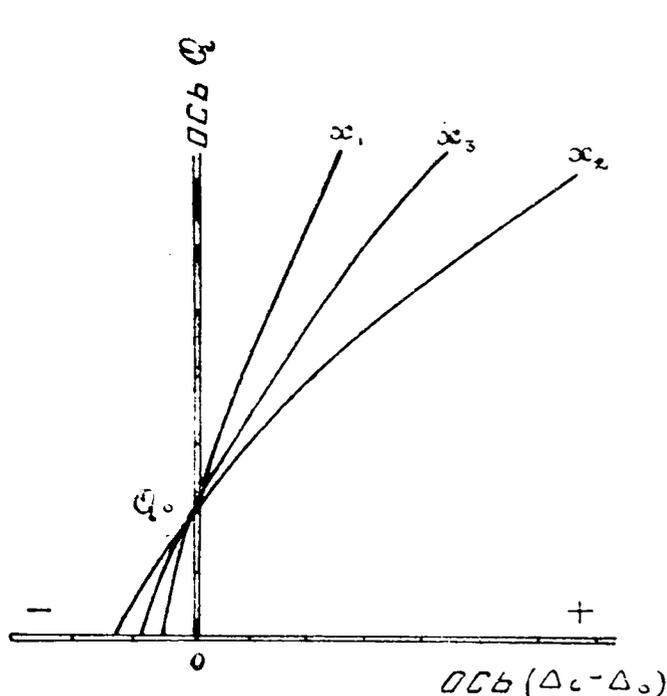
$$\Delta = a Q^2 + b q \dots \dots \dots (80)$$

Из формулы (80) видно, что полное падение реки на протяжении длины L составляется из двух отдельных частей: из „высоты сопротивления“ Δ_c и из „высоты инерции“ Δ_t .

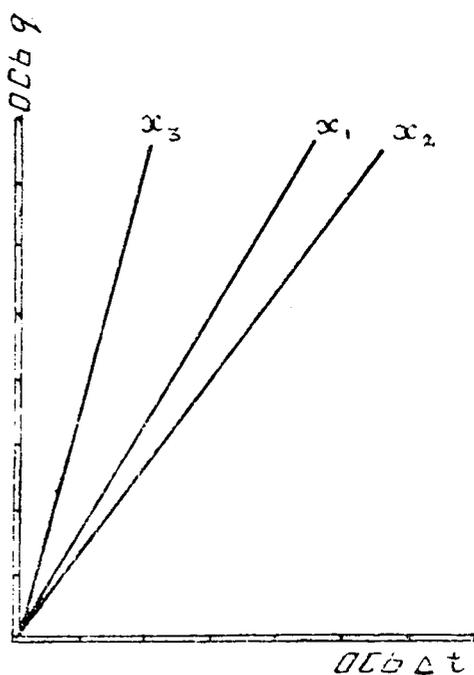
$$\Delta_c = a Q^2 \dots \dots \dots (81)$$

$$\Delta_t = b q \dots \dots \dots (82)$$

Высота Δ_c всегда положительна; высота Δ_t положительна при развитии паводка и отрицательна при его затухании.



Фиг. 2



Фиг. 3

Для последующего расчета нам интересно будет знать не абсолютное падение на длине L , а падение избыточное по отношению и к исходному падению течения установившегося. Называя это избыточное падение буквою δ , будем иметь:

$$\delta = \Delta - \Delta_0 = (\Delta_c - \Delta_0) + \Delta_t = a (Q^2 - Q_0^2) + b q \dots \dots (83)$$

Величина избыточного падения δ легко может быть найдена графически, как сумма чтений по номограммам, схематически представленным на фиг. 2 и 3 ¹⁾.

1) Более точное выражение для δ будет иметь вид:

$$\delta = a Q^2 - a_0 Q_0^2 + b q$$

В соответствии с этим каждая ветвь фиг. 2 будет распадаться на пучок кривых, отвечающих различным значениям горизонта воды.

Каждая из номограмм построена в надлежащих координатных осях, согласно формулы (83), при чем отдельные расчетные линии помечены абсциссами середины участка, на котором искомое избыточное падение сосредоточено.

Если избыточные падения спроектированного режима реки удовлетворят смыслу обеих описанных номограмм, то условие равновесия считается соблюденным.

10. Условие неразрывности.

Общее условие неразрывности (30), переведенное в систему практических координат (H и X), имеет вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -l \frac{\partial H}{\partial t} \dots \dots \dots (84)$$

Интегрируя равенство в пределах расчетной длины L при $t = \text{const.}$, получаем:

$$Q_2 - Q_1 = l L \frac{\partial H}{\partial t} \dots \dots \dots (85)$$

где скорость $\frac{\partial H}{\partial t}$ и ширина реки l имеют средние, для участка, значения. Обозначая буквою ω площадь водного зеркала, расположенного в пределах рассматриваемого участка реки, можем написать:

$$l L = \omega \dots \dots \dots (86)$$

Преобразуя, в соответствии с этим, равенство (85), находим:

$$Q_2 - Q_1 = \omega \frac{\partial H}{\partial t} \dots \dots \dots (87)$$

Умножая обе части (87) на дифференциал времени dt и, интегрируя в надлежащих пределах, получаем:

$$\int_0^t Q_2 dt - \int_0^t Q_1 dt = \omega (H - H_0) \dots \dots \dots (88)$$

где Q_2 и Q_1 —расходы воды на концах расчетного участка L, а H и H_0 —средние для участка отметки уровней мгновенного и исходного.

Вводя обозначения:

$$S_1 = \int_0^t Q_1 dt \dots \dots \dots (89)$$

$$S_2 = \int_0^t Q_2 dt \dots \dots \dots (90)$$

$$u = \omega (H - H_0) \dots \dots \dots (91)$$

назовем S_1 —итог питания на выходе из участка; S_2 —итог питания на входе в участок; u —объем наращенной призмы воды в пределах участка. Пользуясь введенными обозначениями перепишем (88) в новом виде:

$$u = S_2 - S_1 \dots \dots \dots (92)$$

т. е. объем наращенной в пределах участка призмы воды равен разности итогов питания на его концах.

Изображая итоги питания графически, в системе координат объема и времени, получаем пучок кривых, отдельные составляющие которого могут быть помечены номерами тех пунктов реки, для коих они построены. На всякой прямой линии $t = \text{const.}$ кривые итога S отбивают отрезки объема u , равные наращенным призмам воды внутри отдельных участков.

Дифференцируя любое из равенств (89) или (90) по t , находим:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = Q \dots \dots \dots (93)$$

т. е. величина расхода воды Q измеряется наклоном элемента кривой итога S к оси времени T . Этим свойством кривой итога можно пользоваться для нахождения величины Q посредством „полюсного масштаба расходов“ переноса на него нужное направление с графика итогов питания.

Называя буквою Q_0 —естественный расход реки, перепишем равенство (88) в нижеследующем виде:

$$\int_0^t (Q_2 - Q_0) dt - \int_0^t (Q_1 - Q_0) dt = \omega (H - H_0) \dots \dots (94)$$

Вводя обозначения:

$$S_1' = \int_0^t (Q_1 - Q_0) dt \dots \dots \dots (95)$$

$$S_2' = \int_0^t (Q_2 - Q_0) dt \dots \dots \dots (96)$$

условимся именовать: S_1' — избыточным итогом питания на выходе из участка; S_2' — избыточным итогом питания на входе в участок. Равенство (94) примет, при этом вид:

$$u = S_2' - S_1' \dots \dots \dots (97)$$

т. е. об'ем наращенной в пределах участка призмы воды равен разности избыточных итогов питания на его концах. Дифференцируя любое из равенств (95) или (96) по времени, подтверждаем справедливость свойства (93) и для случая избыточных итогов.

Имея в своем распоряжении график итогов питания, содержащий линии всех расчетных пунктов реки, мы можем наглядно проследить полную картину водооборота в пределах исследуемого речного течения. Если отдельные отрезки u графика итогов действительно выражают об'емы соответствующих частных призм, то условие неразрывности должно считаться вполне удовлетворительным.

11. Принцип расчета паводка.

На фиг. 4 схематически изображен продольный профиль реки, на котором нанесены: уровень исходный, отвечающий начальному моменту времени t_0 и уровень текущий, отвечающий рассматриваемому моменту времени t . Вдоль исследуемого течения реки разбивается ряд пунктов $x_1, x_2 \dots$ с таким расчетом, чтобы площади водного зеркала ω , заключенные между этими пунктами были бы равны между собой.

Отдельные водные призмы, заключенные между соседними расчетными пунктами и уровнями исходным и текущим, носят названия „расчетных колодцев“. Обозначая глубину колодца буквою h , можно написать:

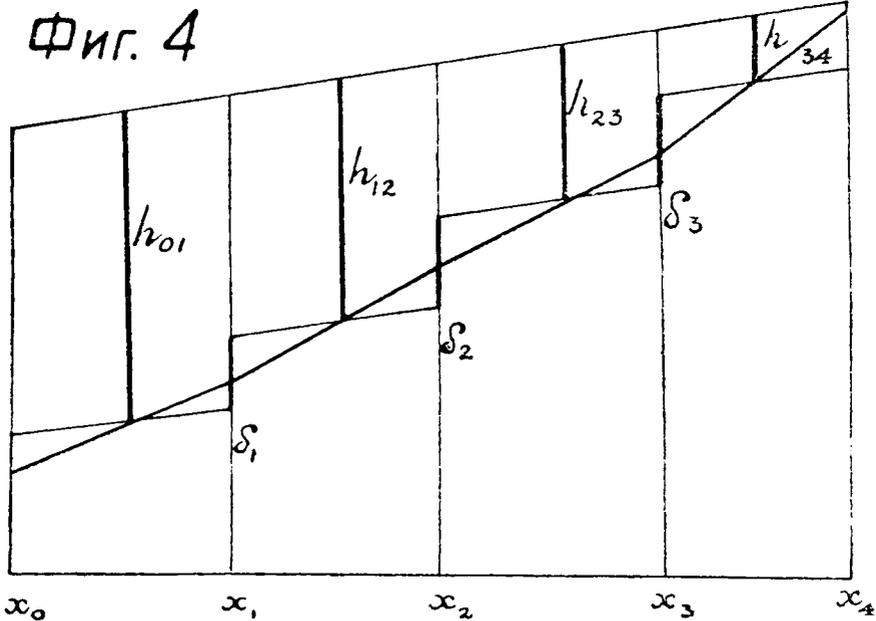
$$u = \omega h \dots \dots \dots (98)$$

т. е. об'ем колодца u равен произведению его глубины h на частную площадь водного зеркала ω .

Сравнивая между собою глубину каждой пары соседних колодцев, находим:

$$\delta_1 = h_{21} - h_{10} \dots \dots \dots (99)$$

т. е. избыточное падение реки δ между осями соседних колодцев равно разности глубин этих колодцев.

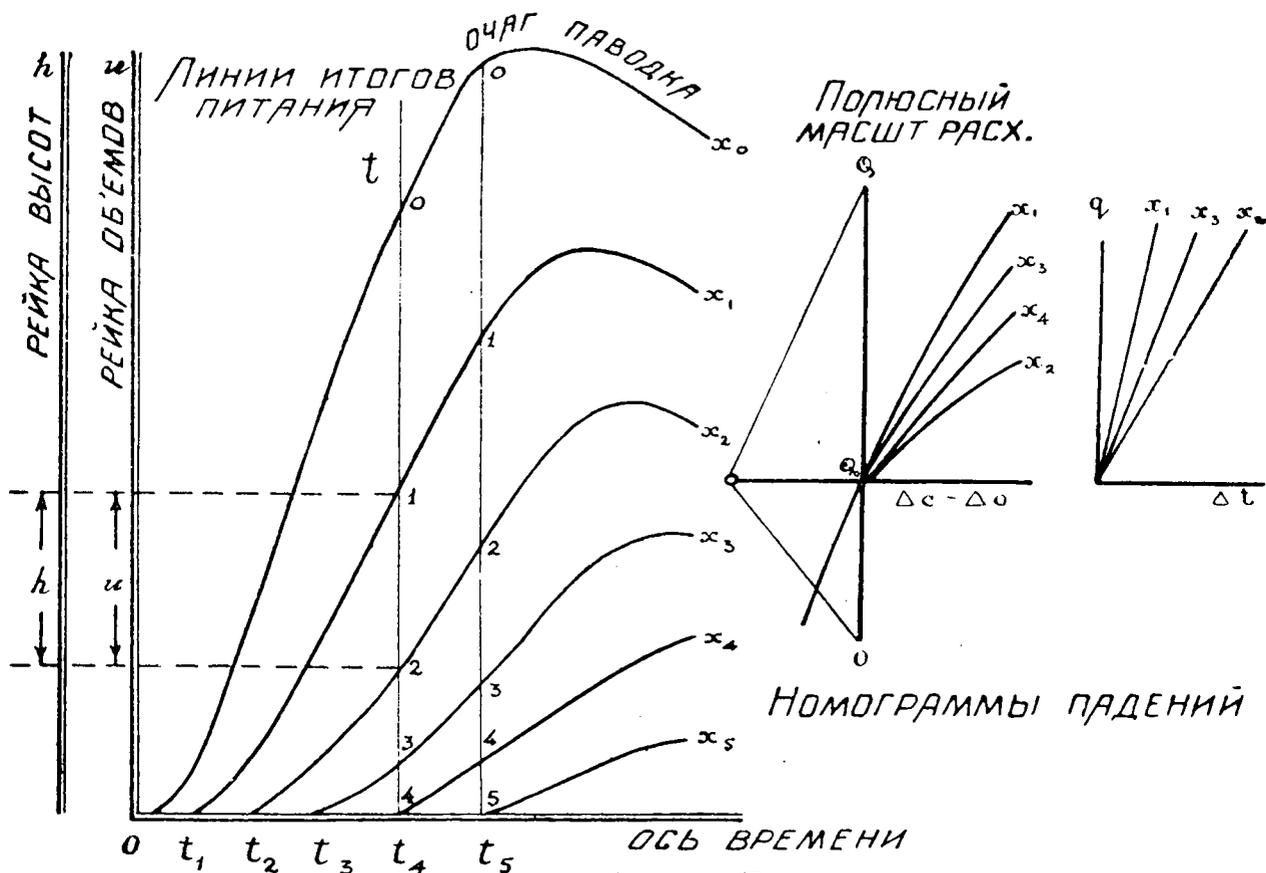


Равенство (99) есть условие равновесия; равенство (98) является условием неразрывности. Совместное решение этих основных условий дает общее уравнение паводка.

$$\delta_1 = \frac{u_{21}}{\omega} - \frac{u_{10}}{\omega} \dots \dots \dots (100)$$

Выведенное уравнение приобретает особо удобный смысл, будучи применено к построению графика итогов питания. График этот изображен на фиг. 5 в координатных осях объема и времени и состоит из ряда кривых отнесенных ко всем расчетным пунктам реки, начиная с очага паводка. Каждая ордината графика представляет из себя избыточный итог питания, даваемый рекою сверх естественного ее итога. Для чтения величин расходов воды Q , здесь же помещен полюсный масштаб расхода с горизонтальным лучом, отвечающим естественному расходу Q_0 . С полюсным масштабом расхода соединена номограмма избыточных высот сопротивления Δ_c служащая, в процессе расчета, естественным ее продолжением. Тут же построена номограмма высот инерции Δ_t .

Назначая некоторый момент времени t_1 проводим ординату t, t , на которой отдельные кривые итогов отсекают ряд отрезков 0—1, 1—2, 2—3... которые мы условимся называть „отрезками-колодцами“. Каждый из полученных отрезков, измеренный в масштабе об'емов, выражает собою, согласно (97)—об'ем соименного с ним колодца.



Фиг. 5

Протягивая рейку высот, параллельно основной рейке об'емов, размечаем ее согласно формулы

$$h = \frac{u}{\omega} \dots \dots \dots (101)$$

где h —чтение по вновь проведенной рейке высот, а ω —общая для всех участков площадь водного зеркала. Решая (100) совместно со (101), находим:

$$\delta_1 = h_{21} - h_{10} \dots \dots \dots (102)$$

т. е. падение, сосредоточенное в некотором пункте реки равно разности сходящихся в этом пункте отрезков-колодцев, прочтенных по рейке высот.

На основании этого свойства может быть построен всякий отрезок—колодец последующий, если известен таковой же отрезок предыдущий. Предположим, что для момента времени t_4 величина отрезка h_{13} , нам, так или иначе, известна. Это значит, что нам известна форма кривой итога x_3 от начала паводка до точки 3. Исходя из этой формы, определяем по полюсному масштабу расхода величины Q и q , пользуясь которыми, находим падение δ_3 , читая обе его составляющие, по помещенным здесь же, номограммам. Последующий отрезок-колодец h_{32} вычисляется, на основании вышеизложенного свойства, по формуле

$$h_{32} = h_{13} - \delta_3 \dots \dots \dots (103)$$

Аналогичным способом могут быть найдены и все прочие отрезки колодцы, лежащие на линии момента времени t_4 .

12. Ход расчета паводка.

Работа начинается с проведения, для очага паводка, заданной кривой итога X_0 и, с построения начальных, отправительных точек $t_1, t_2, t_3 \dots$ всех промежуточных кривых. Точки эти наносятся согласно формулы (73) и указывают моменты времени, когда отдельные пункты реки, вступают в начальную фазу паводка.

Сущность решения задачи заключается в проведении промежуточных кривых итога для всех расчетных пунктов реки и совершается в порядке постепенного перехода от предыдущего момента времени,—к последующему.

Предположим, что искомая система промежуточных кривых нами уже дотянута до момента времени t_4 и, что требуется построить продолжение ее до текущего момента t_5 .

Задавая произвольное приближенное значение отрезка-колодца h_{54} , строим все прочие точки текущего момента описанным выше способом. При удачном значении отрезка h_{54} , последняя точка построения O должна упасть на линию очага паводка x_0 . При отсутствии такого совпадения, всю операцию нужно проделать снова, записавши полученное расхождение „ ε “ на ряду с назначенной исходной величиной h_{54} .

Сделав, таким образом две—три пробы, вычерчиваем графическую функцию

$$\varepsilon = f(h_{54}) \dots \dots \dots (104)$$

из которой и определяем значение исходного отрезка-колодца h_{54} —4 обращающее в нуль величину расхождения „ ε “.

Добившись полной согласованности на рассматриваемом моменте времени t_5 , переходим к моментам последующим, вплоть до последнего. Имея перед собою законченный график итогов питания, распоряжаемся отрезками-колодцами двояким образом, откладывая их от исходного уровня реки и от горизонтального масштаба времени. В первом случае получаем ряд уровней реки мгновенных, во втором—ряд графиков водомерных.

Пользуясь кривыми „итога“, как законом возрастания площади графиков питания, строим эти последние, а при помощи них—составляем ряд контуров расхода для различных моментов времени. Исходя из построенных графиков развиваем дальнейшую иллюстрацию паводка путем составления эпюр следования расходов постоянной величины и кривых расхода для различных пунктов реки.

Проект суточного регулирования р. Волхова,

составленный по графику нагрузки на летний период 1929 г. при естественных расходах реки 136 и 290 куб. метр./сек.

Искомый режим искусственной паводка реки Волхова определяется, с одной стороны, естественными расходами реки, с другой стороны—графиком питания на плотине, предусмотренным планом работ на летний период 1929 года. Выражая эти данные геометрически, очерчиваем кривую „избыточного итога питания“ у плотины, изображенную на чертеже 1 для периода двух первых суток регулирования.

Кривая „избыточного итога“ для горловины озера, показанная на том же чертеже, строится постепенно, отдельными участками, по мере выяснения картины паводка за предыдущее время. Направление этой кривой на протяжении текущего часа принимается равным направлению кривой соседнего пункта реки на протяжении часа предыдущего.

Вся исследуемая длина реки от сооружения до горловины озера (170 кил.) разбивается группой расчетных сечений на 24 участка с постоянным содержанием площади водного зеркала, равным 2 кв. километрам.

Моменты вступления каждого из намеченных пунктов в начальную фазу паводка отбиваются на оси времени, как отправительные точки 23-х промежуточных кривых итога. Группа этих кривых, относящаяся к верхнему пологому течению реки с однообразным гидравлическим сопротивлением может быть построена, в силу последнего обстоятельства, несколько упрощенным способом, сущность которого заключается в следующем.

Принимая некоторый пункт реки за начало нумерации, идущей вверх по течению, составим выражение для глубины начального колодца h_0 . Исходя из схемы, представленной на фиг. 1, можем написать:

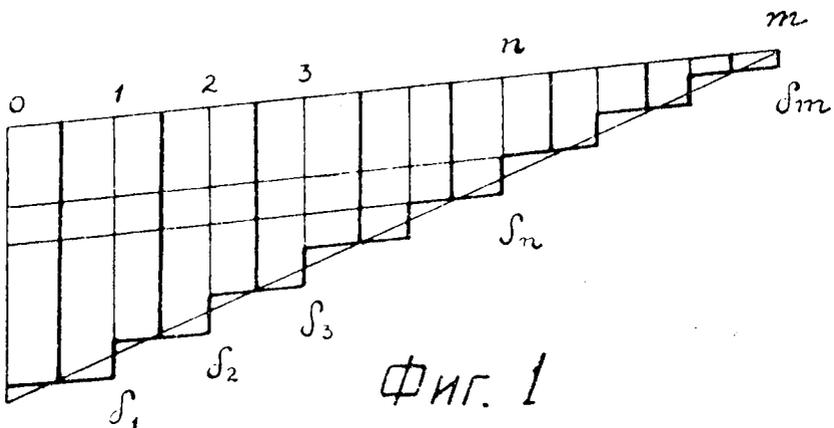
$$h = \sum_{1}^{m} \delta_{11} \dots \dots \dots (1)$$

На основании той же схемы, составляем выражение для общей суммы глубин всех m колодцев, расположенных в промежутке от начального пункта до места выклинивания мгновенного уровня. Сумма эта будет иметь вид:

$$\sum h = \sum_{n=1}^m n \delta_n \dots \dots \dots (2)$$

Разделяя (1) на (2) и обозначая полученное отношение буквою „К“, будем иметь:

$$K = \frac{h}{\sum h} = \frac{1}{\frac{\sum_{n=1}^m n \delta_n}{\sum_{n=1}^m \delta_n}} \dots \dots \dots (3)$$



Полагая, что для участка реки с пологими однообразными уклонами величины δ изменяются по прямолинейному закону, можем написать:

$$\delta_n = \delta_1 + \frac{\delta_m - \delta_1}{m} \cdot n \dots \dots \dots (4)$$

Подставляя (4) в (3) и делая несложные преобразования, находим:

$$K = \frac{\delta_1 \left(\sum n - \frac{\sum n^2}{m} \right) + \delta_m \frac{\sum n^2}{m}}{\delta_1 \left(n - \frac{\sum n}{m} \right) + \delta_m \frac{\sum n}{m}} \dots \dots \dots (5)$$

где все знаки суммы берутся в пределах от 1 до m . Пользуясь формулою (5) можно по общей сумме нескольких отрезков-колодцев $\sum h$, найти величину крайнего отрезка-колодца h . Искомое значение h , согласно (3), будет иметь вид:

$$h = K \sum h \dots \dots \dots (6)$$

Построение промежуточных кривых итога в пределах рассматриваемого расчетного промежутка времени производится ниже-следующим образом.

Назначая линию озера № 24 в соответствии с изложенным выше принципом, задаемся отрезком 24—9, как общей суммой 15-ти составляющих отрезков-колодцев и находим по формуле (6) величину крайнего отрезка 10—9. Зная длину и положение отрезка 10—9, строим прочие отрезки-колодцы по общему правилу, описанному в теоретической части.

Значение коэффициента К для случая 15 слагаемых вычисляется по формуле (5), полагая $m = 15$. Отдельные элементы этой формулы будут равны:

$$\sum_1^{15} n = 120 \quad \frac{\sum n}{m} = \frac{120}{15} = 8 \dots \dots \dots (7)$$

$$\sum_1^{15} n^2 = 1230 \quad \frac{\sum n^2}{m} = \frac{1230}{15} = 82 \dots \dots \dots (8)$$

Составляя по (7) и (8) выражение для коэффициента К, получаем:

$$K = \frac{38\delta_{24} + 82\delta_9}{7\delta_{21} + 8\delta_9} \dots \dots \dots (9)$$

Значения δ_{21} и δ_9 отыскиваются по номограмме падений.

В рассматриваемом нами случае регулирования р. Волхова влияние силы инерции настолько незначительно, что при определении величины падений, принималось в расчет лишь одно гидравлическое сопротивление.

Т а б л и ц ы Судоходных данных при суточном регулировании

НАИМЕНОВАНИЕ ПОРОГОВ	Наименьш. глубина воды метр.	Отметка дна метр.	Наименьшая глубина	Живая площадь	Расход воды	Наибольшая скорость метр./сек.	Гражданское время
$Q_0 = 290$ км/с.							
Петропавловские .	15,15	13,55	1,61	540	450	1,10	5 ч. 30 м. дня
Пчевские	16,10	13,40	2,70	900	390	0,55	3 ч. 40 м. веч.
$Q_0 = 136$ км/с.							
Петропавловские .	15,18	13,55	1,63	540	350	0,85	16 ч. 20 м.
Пчевские	15,74	13,40	2,34	790	190	0,31	19 ч. — м.

Т а б л и ц а

Расчетных элементов

 $Q_0 = 136$ мтр³.
сек. $Q_0^2 = 18496$

р. Волхов

№№ пункт.	Абсциссы пункт. км.	Н	Δ_0	$a = \frac{\Delta_0}{Q_0^2}$ 10 ⁻⁶	$\Delta = a (Q^2 - Q_0^2)$						
					Q = 400	Q = 300	Q = 200	Q = 136	Q = 100	Q = 0	
0	0	15,770									
1	6	15,780	0,010	0,541	0,076	0,039	0,012	0,000	- 0,005	- 0,010	
2	12	15,792	0,012	0,649	0,092	0,046	0,014	0,000	- 0,006	- 0,012	
3	19	15,800	0,008	0,433	0,061	0,031	0,009	0,000	- 0,004	- 0,008	
4	25	15,825	0,025	1,350	0,191	0,096	0,029	0,000	- 0,011	- 0,025	
5	35	15,881	0,056	3,030	0,429	0,216	0,065	0,000	- 0,025	- 0,056	
6	41	15,945	0,064	3,460	0,490	0,248	0,075	0,000	- 0,029	- 0,064	
7	48	15,980	0,035	1,893	0,268	0,135	0,041	0,000	- 0,016	- 0,035	
8	57	15,992	0,012	0,649	0,092	0,046	0,014	0,000	- 0,006	- 0,012	
9	63	16,006	0,014	0,756	0,107	0,054	0,016	0,000	- 0,006	- 0,014	
10	73										

Таблица

Расчетных элементов

 $Q_0 = 290 \frac{\text{мтр}^3}{\text{сек.}}$ $Q_0^2 = 84100$

р. Волхов

№ п. пункт.	Абсциссы пункт. клм.	H	Δ_0	$a = \frac{\Delta_0}{Q_0^2}$ 10^{-6}	$\Delta = a (Q^2 - Q_0^2)$						
					Q = 600	Q = 500	Q = 400, Q = 300	Q = 200	Q = 100	Q = 0	
0	0	15,780									
1	6	15,880	0,100	1,190	0,330	0,200	0,090	0,010	-0,050	-0,090	-0,100
2	12	15,935	0,055	0,654	0,180	0,108	0,050	0,004	-0,029	-0,049	-0,055
3	19	15,970	0,035	0,416	0,115	0,069	0,032	0,002	-0,018	-0,031	-0,035
4	25	16,050	0,080	0,951	0,262	0,158	0,072	0,006	-0,042	-0,071	-0,080
5	35	16,210	0,160	1,900	0,524	0,315	0,144	0,011	-0,084	-0,149	-0,160
6	41	16,370	0,160	1,900	0,524	0,315	0,144	0,011	-0,084	-0,149	-0,160
7	48	16,480	0,110	1,308	0,361	0,217	0,099	0,008	-0,058	-0,097	-0,110
8	57	16,540	0,060	0,713	0,197	0,118	0,054	0,004	-0,031	-0,053	-0,060
9	63	16,560	0,020	0,238	0,066	0,039	0,018	0,001	-0,010	-0,018	-0,020
10	73										

Заключение.

В заключение небезынтересно выяснить особенности предложенного метода решения задачи о суточном регулировании.

Всякое неустановившееся течение, вообще, характеризуется системой совместимых уравнений неразрывности и равновесия, имеющей место для любого элемента потока. Понятие о совместном решении уравнений тесно связано с представлением об общем элементе реки, для которого эти уравнения составлены. Действительно, не имея общего расчетного элемента реки, мы не имеем и тех общих величин, которые могли бы быть исключены из уравнений в процессе совместного их решения. Если в подходе к задаче такого общего расчетного элемента не предусмотрено, то задача становится неразрешимой и создает впечатление о непреодолимых математических трудностях, возникающих при ее решении. Истинная причина этих трудностей, лежащая в нелогичном подходе к решению, обычно ускользает от внимания и создает ложное представление о неразрешимости самого существа задачи.

При подходе к задаче со стороны выбора элемента, общего для обоих теоретических условий, вопрос решается весьма просто и весь процесс решения сводится к ряду общедоступных и, сравнительно, незатейливых построений.

В предлагаемом труде за общий расчетный элемент принят элементарный поперечный профиль реки. Эта особенность отличает его от других подходов, где условие равновесия отнесено к поперечному профилю, а условие неразрывности — к сливной призме.

Описание хода расчета суточного регулирования.

(Составил инж. Г. К. Лоттер.).

В изложении проекта суточного регулирования инженером Н. М. Бернадским не дано достаточно подробного изложения хода отдельных вычислений и графических построений, вследствие чего при фактическом применении теории речного паводка к расчету суточного регулирования возможны некоторые затруднения.

Для избежания таких затруднений и дается настоящее более подробное описание хода расчета.

Исходными данными для расчета служат:

- 1) суточный график нагрузки, который станция должна покрыть,
- 2) естественный режим реки¹⁾ и
- 3) продольный и поперечные профили и план реки в горизонталях.

График нагрузки дается обычно в киловаттах и должен быть переработан в суточный график количества воды (гидрограф), которое необходимо для выработки потребного количества энергии.

Если обозначить через:

φ —коэффициент полезного действия всей установки от подвода воды к турбинам до шин понижающей подстанции,

Q —расход воды в мтр.³/сек.

H —действующий напор в мтр.

N —мощность в кв., то

$$N = \frac{1000\varphi QH}{75} \times 0,736 = 9,81\varphi QH \text{ кв.}$$

или

$$Q = \frac{N}{9,81\varphi H} \text{ мтр.}^3/\text{сек.}$$

¹⁾ Под естественным режимом здесь понимается режим реки, уже подпертой плотиной.

Пользуясь указанной зависимостью, не представляет труда заданный график нагрузки перестроить в график количества воды (расходов), потребной для выработки необходимой энергии.

Графики расходов, соответствующие графикам нагрузки, инженером Н. М. Бернадским названы „графиками питания на плотине“.

Условно принято, что в начале суток потребная мощность соответствует естественному расходу в реке.

Такие графики питания у плотины Волховской установки применительно к летнему графику нагрузки Ленинграда в 1929 г. построены в Отделе Водного Хозяйства Волховстроя и показаны на листах № 3 и № 5 с надписью „у плотины“ для естественных расходов в реке 290 куб. мтр./сек. и 136 куб. мтр./сек.

Установив график питания на плотине, переходим к определению расчетных элементов, зависящих от естественного режима реки.

Для этой цели, пользуясь планом русла, составляют график нарастания площади зеркала по длине реки для рассматриваемого режима и, на основании этого графика, разбивают реку на произвольное число участков такого протяжения, чтобы площади зеркал участков были равны между собою. Для реки Волхова число таких участков принято 24.

График нарастания площади зеркала р. Волхова показан на листе № 7. Если конфигурация русла такова, что площади зеркала при разных расходах (для которых требуется суточное регулирование) не особенно значительно отличаются друг от друга, то разбивка реки на участки сохраняется для всех расходов одной и той же.

Для выбранных участков вычисляют средние гидравлические радиусы и средние площади живых сечений.

Для границ участков выписывают из продольного профиля реки отметки горизонтов воды и вычисляют падения на участках.

Полное падение гор. воды на любом участке выражается:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_t = \frac{cL}{RF^2} Q^2 + \frac{L}{3600 g F} q = a Q^2 + bq$$

где падение $\Delta_c = a Q^2$ от сопротивления русла и падение $\Delta_t = bq$ зависящее от инерции. Значение остальных входящих в формулу букв приведено на стр. 6.

В условиях естественного режима движение воды на каждом участке возможно рассматривать как равномерное и, следовательно, без затруднений определить величину коэффициента „а“:

$$a = \frac{\Delta_0}{Q^2}$$

где Δ_0 и Q известны из режима реки.

Такие вычисления для р. Волхова приведены в таблицах на стр. 36 и 37, в которых: первая графа обозначает номер профилей (границ участков), вторая—расстояние профилей от плотины, третья—отметки гор. воды на профилях, четвертая—величина падения (Δ_0) и пятая—значение коэффициента „а“.

Как указано в теории расчета, а также и в введении, значение коэффициента „а“ для определенного естественного режима во все время регулирования принимается постоянным.

При расчетах суточного регулирования в условиях р. Волхова представилось возможным влиянием инерции пренебречь и потому значения коэффициентов „b“ не определялись. Если бы в других условиях потребовалось учесть и влияние инерции, то для вычисления коэффициента „b“ необходимо было бы по подсчитанным средним площадям живых сечений и длине участков вычислить величины коэффициентов „b“, пользуясь выражением

$$b = \frac{L}{3600 g F} = \frac{L}{3600 \times 9,81 \times F}$$

Дальнейший процесс вычислений заключается в определении необходимых добавочных падений (δ) на участках для пропуска регулируемых расходов.

Подсчеты ведутся на основании выражения:

$$\delta = \Delta - \Delta_0 = a (Q_t^2 - Q_0^2)$$

где a —определенный выше коэффициент,

Q_t — расход регулируемый,

Q_0 — расход бытовой (естественный).

Для проекта регулирования р. Волхова результаты вычисления добавочных падений на отдельных участках показаны в таблицах на стр. 36—37.

Вычисленные величины добавочных падений представляются для удобства пользования графически.

О методе построения графиков добавочных падений будет сказано ниже.

В дальнейшем переходим к составлению основного расчетного графика—к графику избыточного питания.

График этот составляется на основании описанного выше графика питания у плотины и естественного (бытового) расхода воды в реке. При регулируемых расходах больших бытового получается положительный избыток питания, в обратном случае — отрицательный.

Если просуммировать разности $(Q_t - Q_0) dt$ и представить суммарные разности $\int_0^t (Q_t - Q_0) dt$ от начала регулирования до какого-либо момента времени графически, то полученная кривая (интегральная) и представит собой график итогов избыточного питания. По оси абсцисс откладывается время (часы суток), по оси ординат об'емы равные $\int_0^t (Q_t - Q_0) dt$, т. е. сумма разностей регулируемого и бытового стока от начального момента регулирования до рассматриваемого часа.

Таким образом каждая ордината представляет собой то количество воды, которое необходимо заимствовать к рассматриваемому моменту времени из бьефа, чтобы осуществить заданный график нагрузки.

Для проекта регулирования р. Волхова такие графики представлены на листах № I и № V (кривые, помеченные индексами 0). Вычисление выполняется по следующей таблице:

Время от начала регулирования, в час.	Интервалы времени в часах (dt)	Регулируемый расход Q_t куб./сек.	Бытовой расход в реке Q_0 куб. мтр./с.	Избыточный расход $(Q_t - Q_0) = q_m$	Средний избыточный расход за интервал времени $q_{cp} = q_m + q_m + 1$	Расходуемый об'ем воды за интервал времени $V_n = 3600 q_{pc} dt$ милл. мтр. ³	Израсходованный об'ем от начала регулирования $\sum V_n$ в милл. куб. метр.
0		290	290	0			0
2	2	400	290	110	55	0,396	0,396
4	2	600	290	310	210	1,51	1,906
6	2	600	290	310	310	2,23	4,136

Для удобства расчета на этом же листе чертежа необходимо построить график добавочных падений на участках (см. выше). Так как тангенсы углов касательной к кривой графика итогов избыточного питания (интегральной) в любой точке по величине

пропорциональны разности регулируемого и бытового расхода, то при построении графика добавочных падений по оси ординат откладываются тангенсы пропорциональные разности расходов; величины добавочных падений откладываются по оси абсцисс. Практически, построение выполняется следующим образом: из какой-либо точки (полюс) проводят горизонтальный луч, над которым надписывают величину бытового расхода, затем, сообразуясь с масштабом графика итогов избыточного питания, из той же точки проводят ряд лучей, тангенсы углов которых с горизонталью пропорциональны разности регулируемых расходов с бытовым (полюсный масштаб). На этих лучах надписывают соответственные величины расходов. Проводя на некотором расстоянии от полюса вертикаль (расстояние выбирается в зависимости от желаемой крупности масштаба) и доводя лучи до пересечения с вертикалью, получаем вертикальный масштаб избыточных расходов ($Q_t - Q_0$). Откладывая против каждого расхода в горизонтальном направлении соответственные величины добавочных падений (величины которых предварительно были вычислены), получаем графически для каждого участка реки зависимость между добавочным падением (δ) и избыточным расходом. Для проекта регулирования р. Волхова графики эти показаны на листах №№ 1 и 4 (бытовые расходы 290 и 136 метр.³/сек.) посередине листа.

Следующий процесс расчета заключается в вычислении скорости распространения волны возмущения от регулирования и времени, в течение которого возмущение достигнет того или иного пункта реки.

Так как при расчетах сутки разбиваются на отдельные промежутки, то следовательно вычислением должно быть определено то расстояние, которое волна возмущения за данный промежуток времени (от начала регулирования) успеет пройти.

Вычисление выполняется по формулам:

Для скорости возмущения:

$$\Theta = V \pm \sqrt{gR}$$

где R —средний подводный радиус для участка,

Θ —скорость распространения возмущения,

V —скорость течения (обычно ею можно пренебречь).

Для определения времени распространения возмущения:

$$t = \int_0^x \frac{dx}{V \pm \sqrt{gR_x}}$$

Интегрирование заменяется простым суммированием по участкам.

Вычисление производится по следующей таблице:

№№ профил. (гранц. участков).	Расстояние профилей от плотины в км.	Расстояние между профилями (длина участков) в мтр.	Площадь живого сечения в профил. в квадр. мтр.	Средняя площадь живого сечения.	Гидравлический радиус в мтр.	Скорость распространения возмущения в сек.	Время пробега волны возмущения участка в минутах.	Полное время пробега волны возмущения от плот. до проф. в часах.
0 0		6000	3600	2740	10,0	9,9	10,1	0
1 6		6000	1880	1540	4,9	6,94	14,4	0,17
2 12		7000	1180	1020	4,08	6,34	18,4	0,41
3 19		6000	860	970	3,88	6,18	16,2	0,72
4 25			1080					0,95

Скорость распространения волны возмущения по реке может быть изображен графически. В этом случае по оси абсцисс откладывается километраж реки, по оси ординат—время. Для реки Волхова такой график показан на листах 3 и 6 в графике следования избыточных расходов.

Определив по приведенным формулам время распространения возмущения до каждого профиля, наносят эти моменты по оси абсцисс графика избыточного питания (см. листы № 1 и № 4 точки 1, 2 . . по оси абсцисс).

Точки эти указывают моменты времени, когда до отдельных пунктов реки дошла волна возмущения и служат отправными для дальнейших подсчетов. Эти точки названы инж. Н. М. Бернадским начальными отправными точками данного участка.

Как уже было указано выше, ось абсцисс графиков итогов избыточного питания представляет собой ось времени. Выбирая определенные интервалы времени (для проекта регулирования р. Волхова интервал принят в 3 часа), проводят соответственные им ординаты. Из теории паводка известно, что каждый отрезок ординаты, заключенный между осью абсцисс и интегральной кривой избыточных расходов, представляет собой тот об'ем воды, который от начала регулирования до рассматриваемого момента заимствован из всего бьефа. Так как площади зеркал всех участков выбраны равными, то следовательно та же ордината по-

величине равна $\omega \sum h$, т. е. заимствованной из бьефа объем воды равен произведению площади зеркала одного участка на сумму понижений уровня во всех участках. Это обстоятельство позволяет на графиках итогов избыточного питания рядом с масштабом объемов поместить и масштаб высот (понижений или повышений уровней на участках).

Задавая произвольно объемом воды, заимствованным из первого участка (или что тоже глубиной расчетного колодца h) в течение выбранного интервала времени, откладываем эту величину от исходного графика итогов избыточного питания у плотины вниз и соединяем полученную точку плавной кривой, подобной очертанию кривой итогов у плотины, с начальной отправной точкой того же участка¹⁾. Тангенс наклона линии дает величину регулируемого расхода в этом участке, и расход этот может быть прочтен по полюсному масштабу, а затем по графику добавочных падений определено и необходимое добавочное падение (δ).

Величина объема воды, заимствованная из соседнего (второго) участка (глубина колодца), связана с глубиной рассматриваемого (колодца) участка зависимостью (см. черт. 4, стр. 29):

$$h_{12} = h_{01} - \delta_1$$

Определив величину h_{12} и отложив ее по той же ординате вниз от предыдущей точки, соединяем новую точку (2) с начальной отправной точкой 2-го участка. Делаем подсчеты такие же, как и для 1-го участка и определяем глубину третьего расчетного колодца (участка) (h_{23}). Аналогично поступаем и для остальных участков.

Если в конечном итоге сумма глубин всех колодцев (тех, которые к рассматриваемому моменту попали в сферу возмущения) окажется равной величине итога избыточного питания к данному моменту времени, то глубины колодцев назначены правильно, если этого не будет, то глубину первого колодца, которая была назначена произвольно, придется изменить и повторять вычисления до тех пор, пока это равенство будет достигнуто, т. е. пока конечная точка последнего нижнего отрезка ординаты не попадет на ось абсцисс¹⁾.

Выполнив вычисления для одного промежутка времени (напр., 3 часа), и разбив таким образом одну ординату графика питания, — переходят к следующему и т. д.

¹⁾ На практике, во избежание загромождения чертежа, это делается посредством кусочка бумажки и треугольников.

Необходимо отметить, что при наличии значительного озера, как это имеет место для случая р. Волхова, предполагается, что суточное регулирование на уровень озера не влияет. Действительно, для заимствования из озера Ильмень всего лишь 0,7 милл. куб. метр. понижение уровня составит

$$\frac{0,7 \times 10^6}{800 \times 1000^2} \times 100 = 0,09 \text{ см.} < 1 \text{ мм.}$$

Это обстоятельство позволяет допустить, что на озерном участке в рассматриваемый момент времени устанавливается расход по величине равный расходу в соседнем участке за предшествовавший момент времени

На основании этого допущения возможно построить кривую итогов питания для озерного участка, пользуясь кривой итогов для участка соседнего. Поясним построение на примере р. Волхова: пусть к моменту T возмущение дошло до 23 участка.

На основании выше изложенного строим итоги питания для всех 23 участков. В следующий интервал времени возмущение достигает озера; тогда из точки 24 на оси абсцисс проводят линию параллельную кривой итога питания соседнего (23) участка (что означает равенство расходов) и полученная линия принимается за кривую итогов питания озерного участка. Ординаты заключенные между кривыми итогов питания на плотине и озерного участка даст об.ем воды, заимствованный из реки, и за все последующие моменты времени вычисления должны относиться к этим ординатам. Ординаты между кривой итогов питания озерного участка и осью абсцисс дают величины об'ема воды, заимствованной из озера.

Назначив на всех ординатах, согласно предыдущему, глубины всех расчетных колодцев, получаем ряд плавных кривых, представляющих собою кривые итогов питания для границ отдельных участков.

Отрезки ординат, заключенные между отдельными кривыми, по масштабу высот дают понижение или повышение уровня для участка, заключенного между соответственными профилями. Тангенсы углов наклона касательных к тем же кривым итогов питания, дают величины избыточных расходов. Таким образом представляется возможным построить для средних участков графики колебания уровня при суточном регулировании, а по

1) Там, где возмущение достигло уже озера и на чертеже имеется уже кривая итогов избыточн. питания озера (24 уч.) конечными пунктами считаются точки на этой кривой.

Бытовой расход	Расход при регулировании								Коэффициент увелич. расход. у плотины.	Наибольшее понижение уровня ниже гребня плотины		Перелив: наибольшее повышение ур. выше гребня плотины	Полезн. об'ем воды верхн. бьефа вводимый в регулирование мтр. ³	Потеря об'ема воды (перелив.) при регулировании мтр. ³	Время распространения волны возмущения от плотины до озера в часах	Об'ем воды, оз. Ильмень, участвующий в регулировании мтр. ³
	Наибольший				Наименьший											
	1 сут.		2 сут.		1 сут.		2 сут.									
	плот.	озеро	плот.	озеро	плот.	озеро	плот.	озеро								
30 кб. с/с. = =290 кб. м/с.	600	320	600	320	0	255	0	255	2,07	0,97	0,87 ¹⁾	0,40	$9,0 \times 10^6$	$1,10 \times 10^6$	7	$0,76 \times 10^6$
14 кб. с/с. = =136 кб. м/с.	400	166	400	166	0	100	0	100	2,94	0,59	0,55	0,19	$3,5 \times 10^6$	$0,47 \times 10^6$	7	$0,88 \times 10^6$

1) На вторые сутки вода подымается над гребнем на 0,40 мтр. и таким образом полное понижение уровня у плотины будет $0,87 + 0,40 = 1,27$ мтр.

этим последним и мгновенные профили уровней для каждого часа. Построения эти для проекта суточного регулирования р. Волхова показаны на листах № 2 и № 5. Имея мгновенные профили уровней, не представляет затруднений построить водомерный график для любого пункта реки. Для Волхова такие построения исполнены для всех постоянных водомерных постов (лист № 2 и № 5).

Пользуясь графиком итогов избыточных питаний для отдельных профилей, представляется возможным построить диаграмму изменений по времени и длине реки избыточных расходов. Для р. Волхова такие диаграммы показаны на листах № 3 и № 6 и названы графиком следования избыточных расходов.

Вертикальное сечение по такой диаграмме позволяет построить кривые регулированных расходов для любого пункта реки. Кривые для Гостинополя показаны на листах № 3 и № 6. Горизонтальные сечения по графику следования избыточных расходов позволяют построить мгновенное распределение расходов воды вдоль реки для любого момента времени. Графики эти инж. Н. М. Бернадским названы графиками контуров расходов и для р. Волхова построены на листах № 3 и № 6.

Закончив описание хода расчета суточного регулирования, сделаем несколько выводов из проекта суточного регулирования р. Волхова.

Результаты построения суточного регулирования (в метрах): приведены в таблице на стр. 47.

Как усматривается из таблицы, в суточном регулировании участвует весь Волхов и даже добавочно стягивается часть воды, правда, незначительная, из оз. Ильменя.

Коэффициент регулирования для р. Волхова при бытовом расходе в 135 куб. мтр./сек. получился равным 3, при чем однако понижение уровня далеко не достигло предела. Это обстоятельство указывает, что на Волхове возможно еще более резкое регулирование, не выходя из пределов технически допустимого понижения уровня у плотины.

При бытовом расходе в 290 куб. метр. и соответственном графике нагрузки коэффициент регулирования определился в 2, при чем этот коэффициент для принятых условий должен считаться предельным, так как понижение уровня у плотины достигает своего крайнего допустимого значения (1,0 метр.).

Замеченные опечатки.

<i>Где:</i>	<i>Напечатано:</i>	<i>Должно быть:</i>
На стр. 9, 5 строчка сверху	418000	470000
На стр. 35, 19 строчка сверху	Таблицы	Таблица
На стр. 35 в таблице—наименование второй графы	Наименьшая глубина воды метр.	Наименьшая отметка уровня воды—метр.
Там же наименование последней графы	Гражданское время	Время, когда наблюдается наименьший уровень, принимая начало регулирования в 8 часов.
Там же, 5 строчка снизу	5 ч. 30 м. дня	17 ч. 30 м.
Там же, 4 строчка снизу	3 ч. 40 м. веч.	20 ч. 40 м.
Там же после таблицы	—	

Примечание: Указанная в табл. отметка дна Пчевских порогов „13,40 мтр.“ или 6.29 с. относится к промеру порогов в 1922 г.; повторный промер при низкой воде в 1924 г. дал наивысшую отметку дна на судовом ходе Пчевск. порогов 6,56 с. или 13,97 мтр.

При этом данные в таблице вероятные наименьшие глубины на перекате (143 в.) 2,70 и 2,34 мтр. могут уменьшиться до 2,13 и 1,77 мтр. соответственно при расходах 290 и 136 куб. мтр./сек.

ГРАФИК ИТОГОВ ИЗБЫТОЧНОГО ПИТАНИЯ.

К ПРОЕКТУ СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА 30 КМБ. С ЯМ. СЕК. = 290 КМБ. МЕТР. СЕК.

Р. ВОЛХОВ.

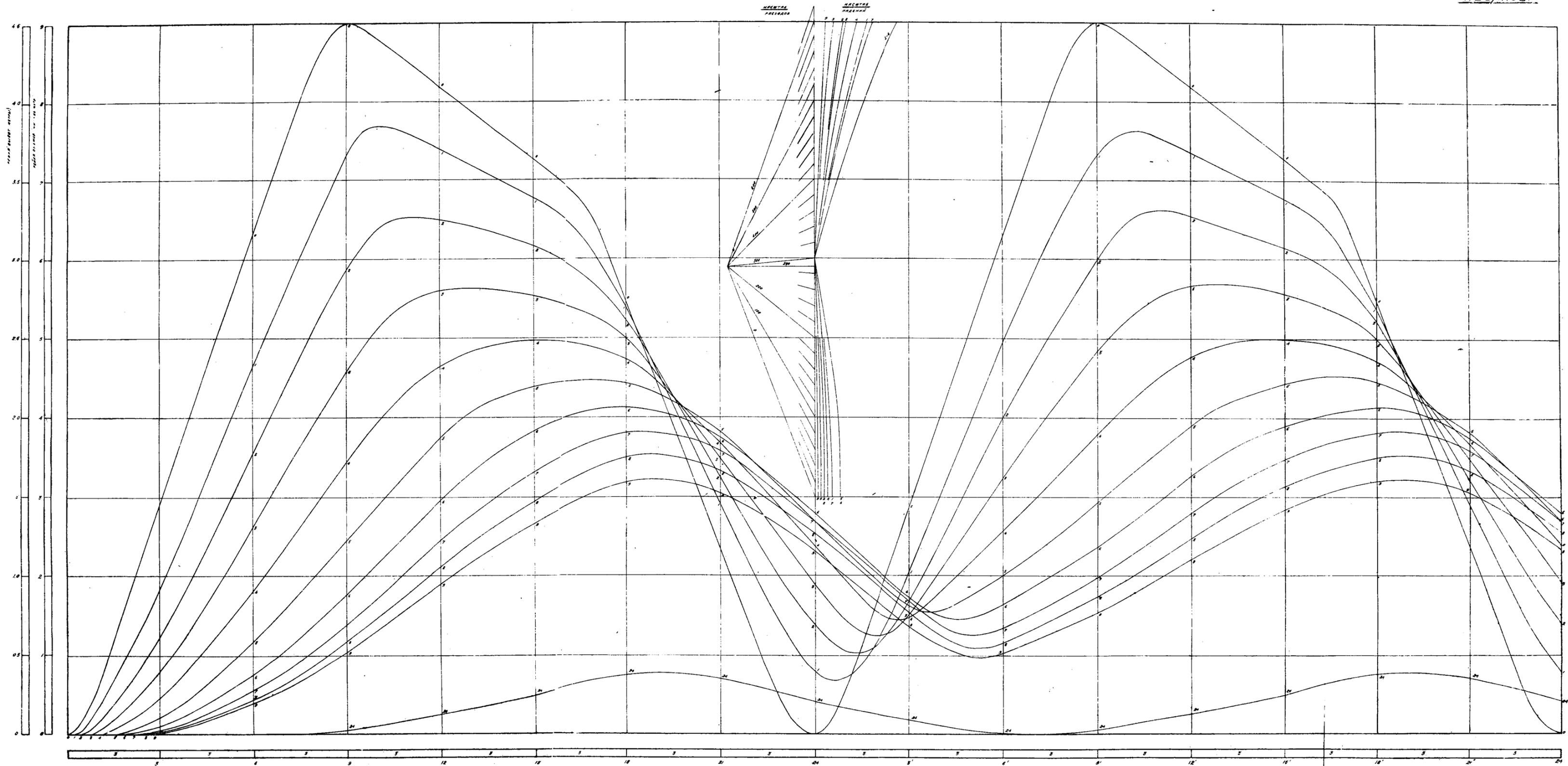


ГРАФИК СЛЕДОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ РАСХОДОВ

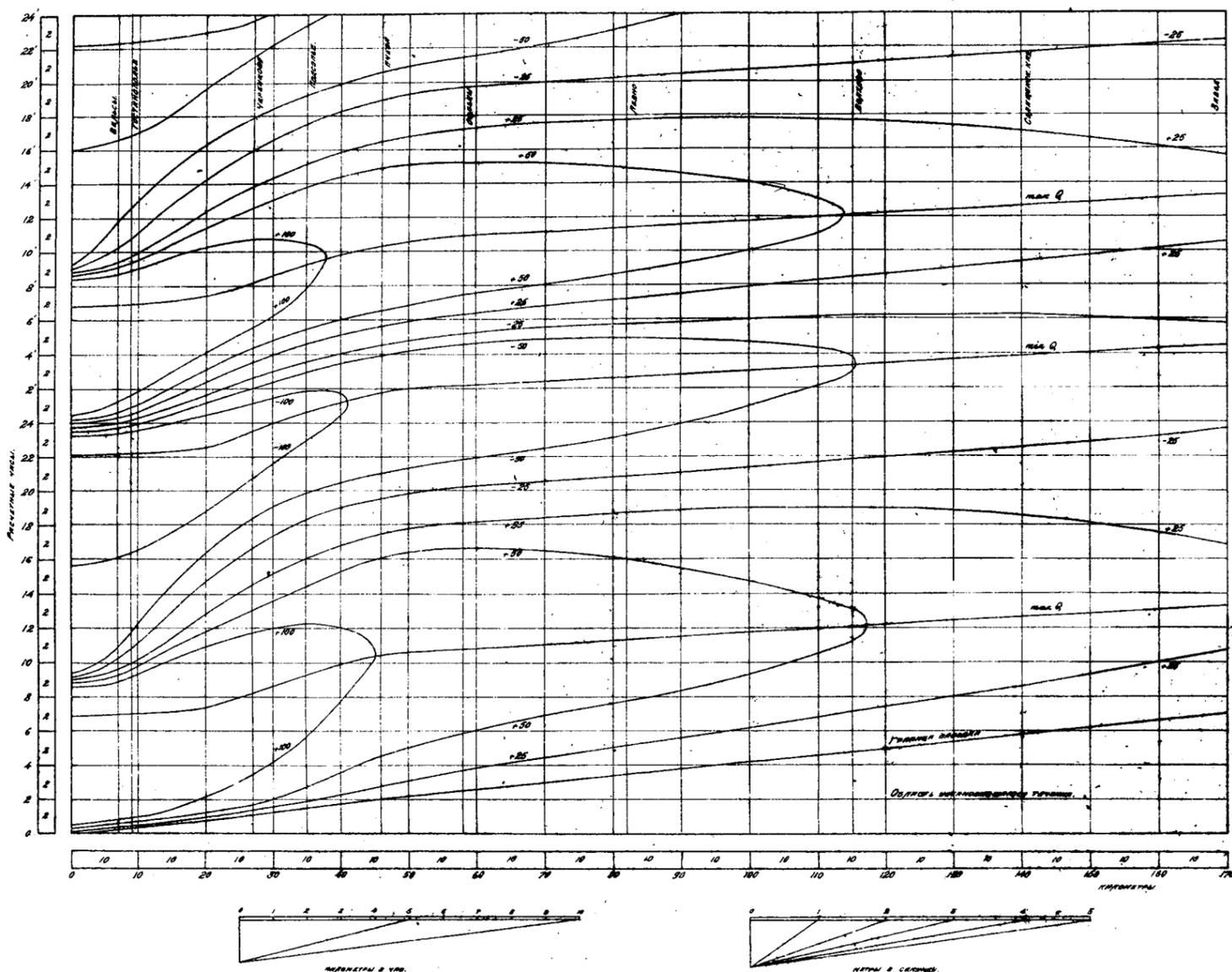


ГРАФИК ПИТАНИЯ

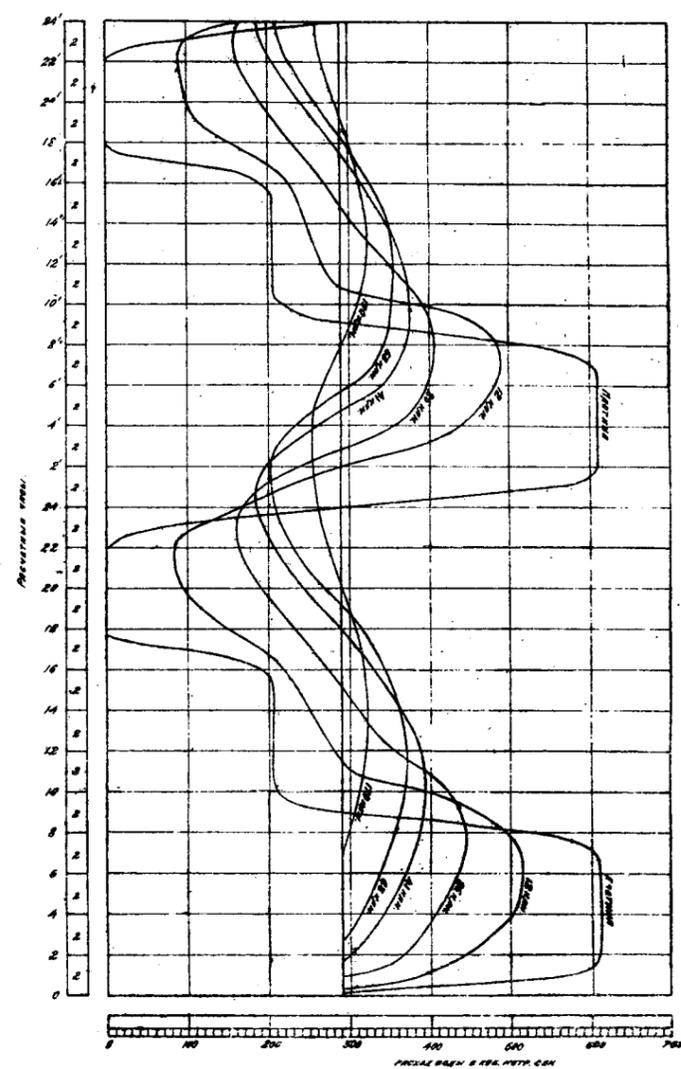
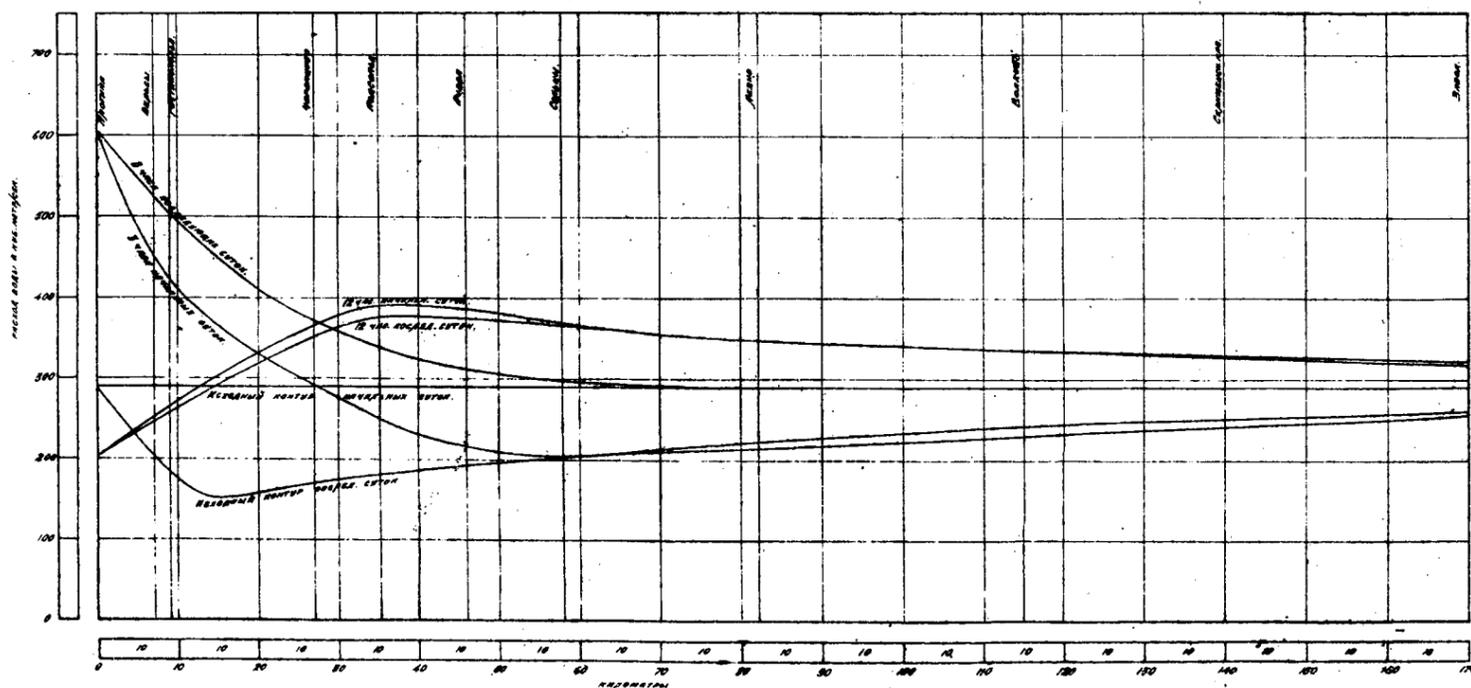


ГРАФИК КОНТУРОВ РАСХОДА



КРИВАЯ РАСХОДА В ГОСТИНОПОЛЬЕ

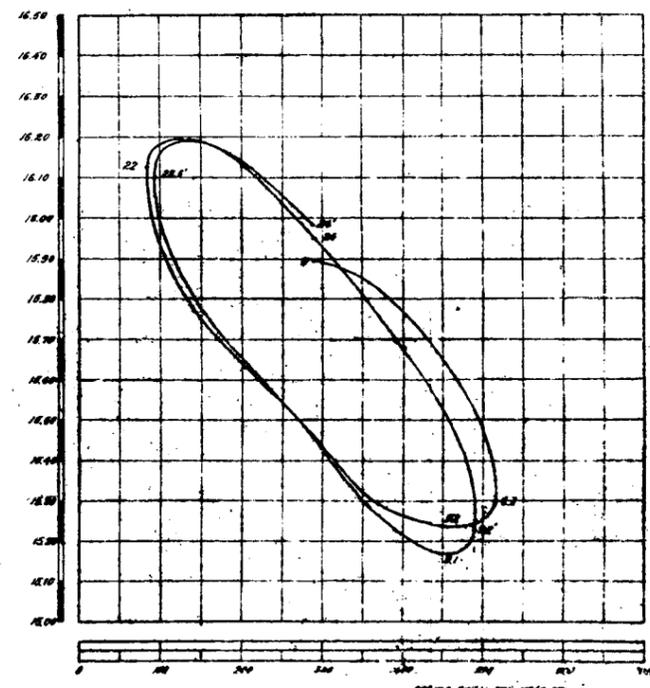
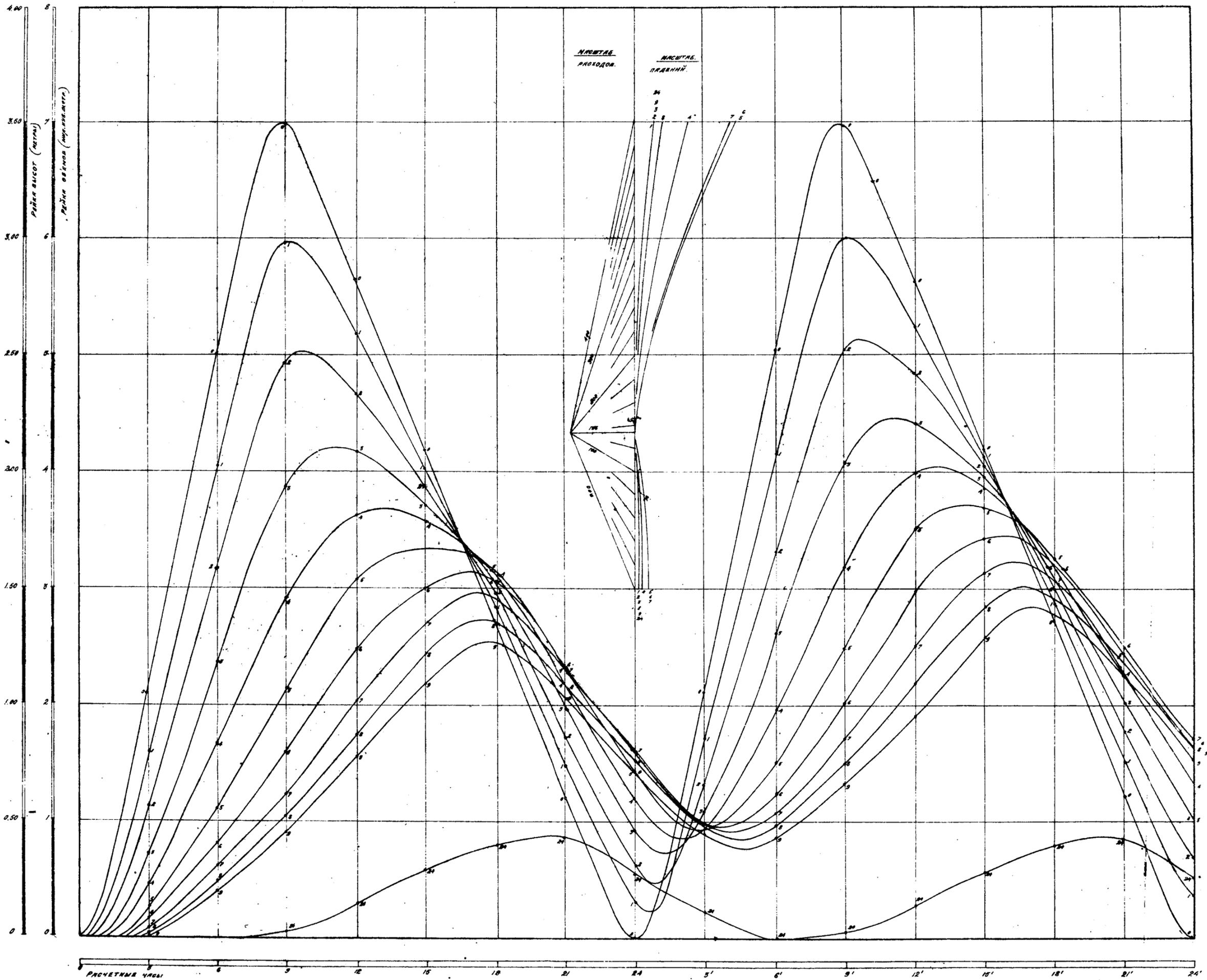
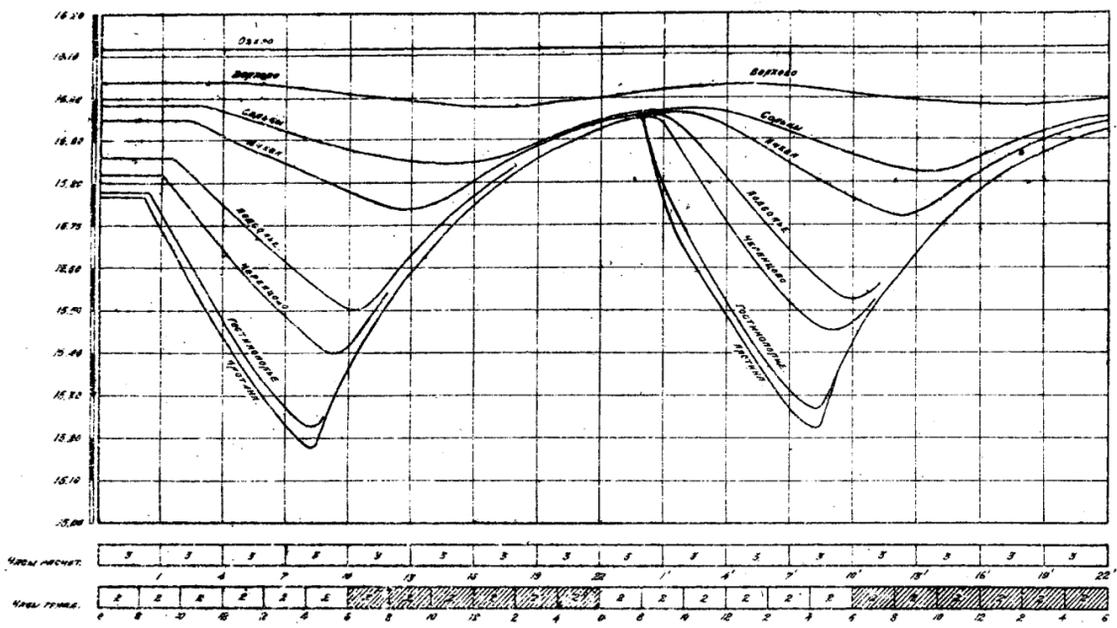


ГРАФИК ИТОГОВ ИЗБЫТОЧНОГО ПИТАНИЯ



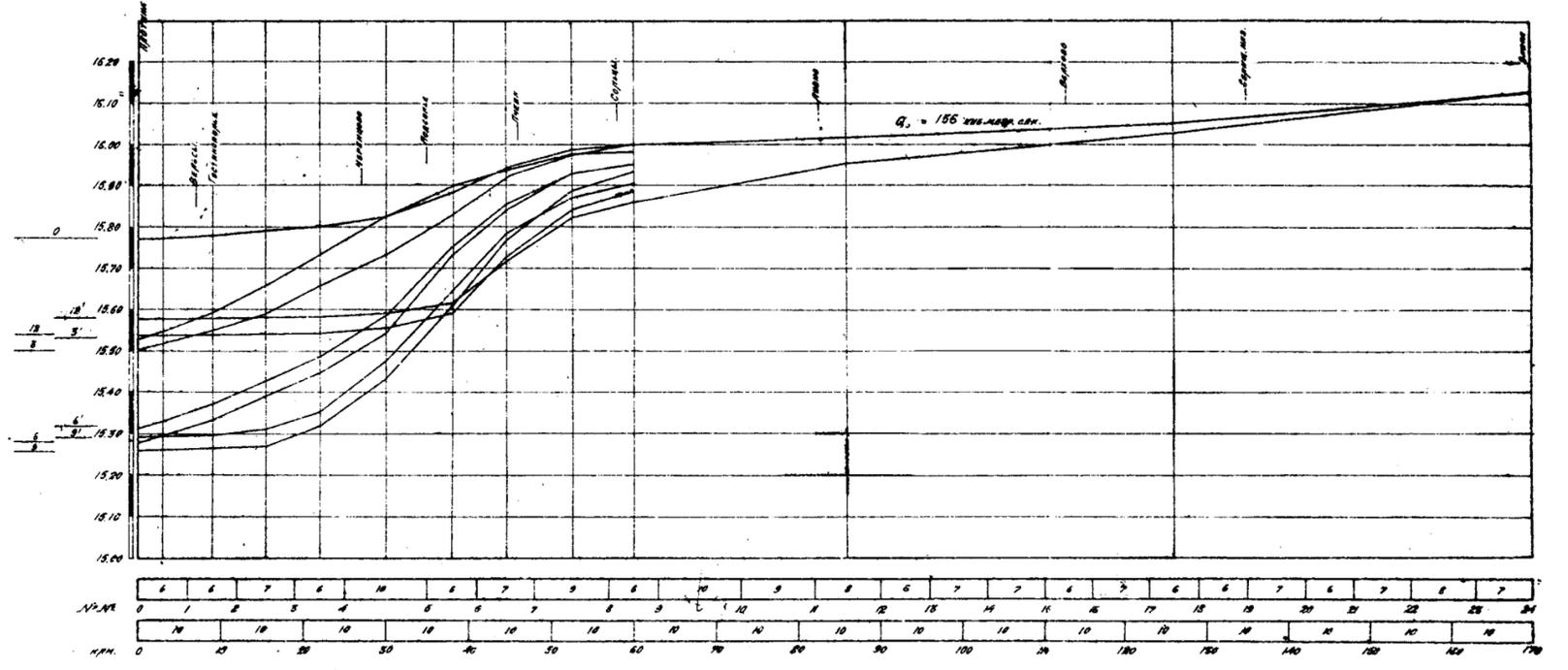
ГРАФИКИ ВОДОМЕРНЫЕ

НА ВОДОМЕРНЫХ РЕЙКАХ

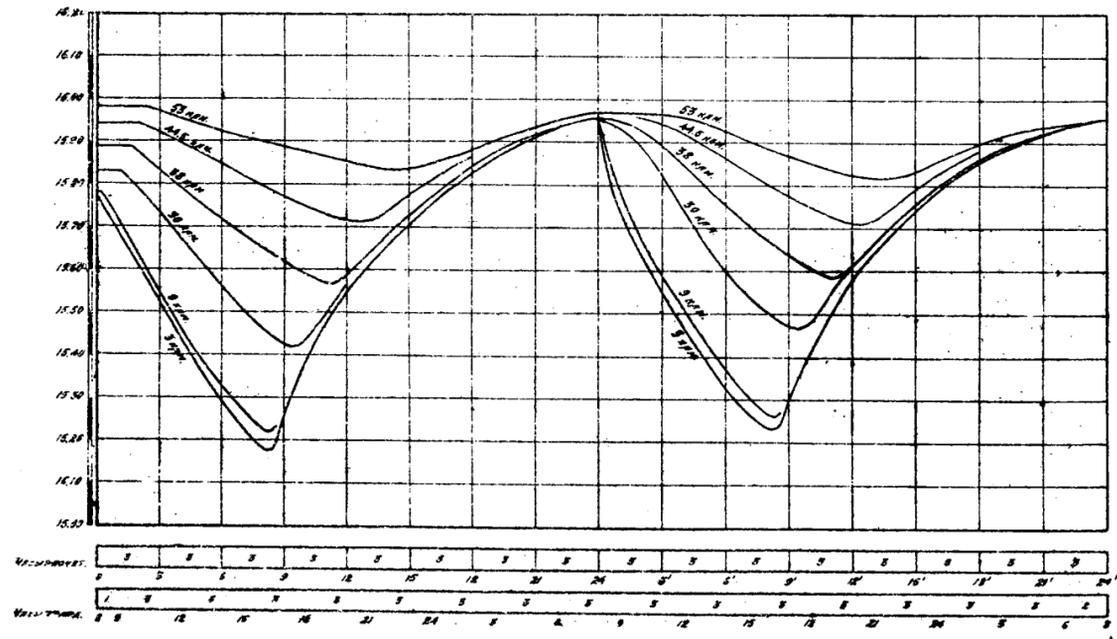


ГРАФИКИ МГНОВЕННЫХ УРОВНЕЙ

ПЕРВАЯ ПОЛОВИНА ДВУХ ПЕРВЫХ РАБОЧИХ СУТОК



НА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРОФИЛЯХ



ВТОРАЯ ПОЛОВИНА ТЕХ ЖЕ СУТОК

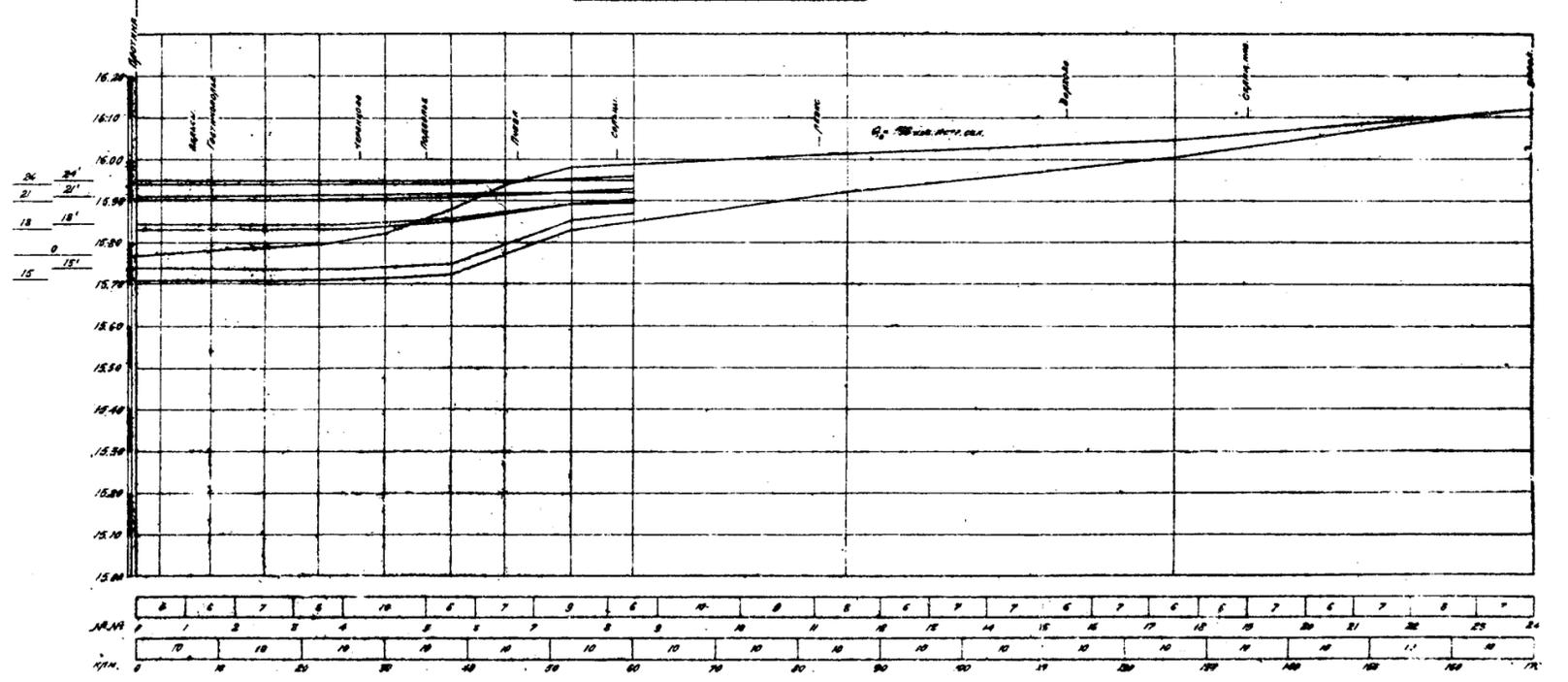


ГРАФИК СЛЕДОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ РАСХОДОВ.

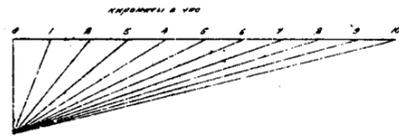
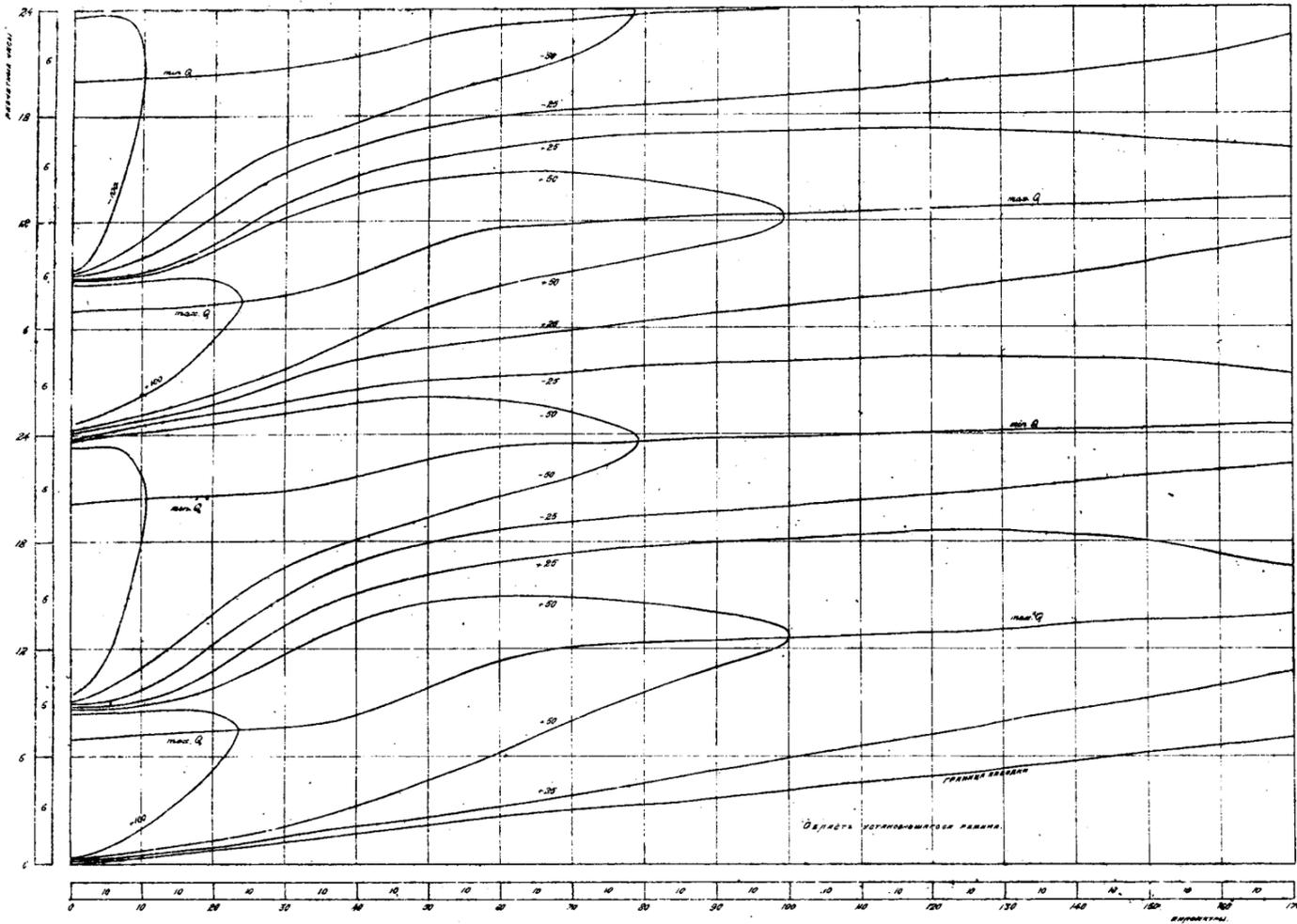


ГРАФИК КОНТУРОВ РАСХОДА.

ХАРАКТЕРНЫЕ КОНТУРЫ РАСХОДА ДЛЯ СЕТОК НАЧАЛЬНЫХ И ПОСЛЕДУЮЩИХ.

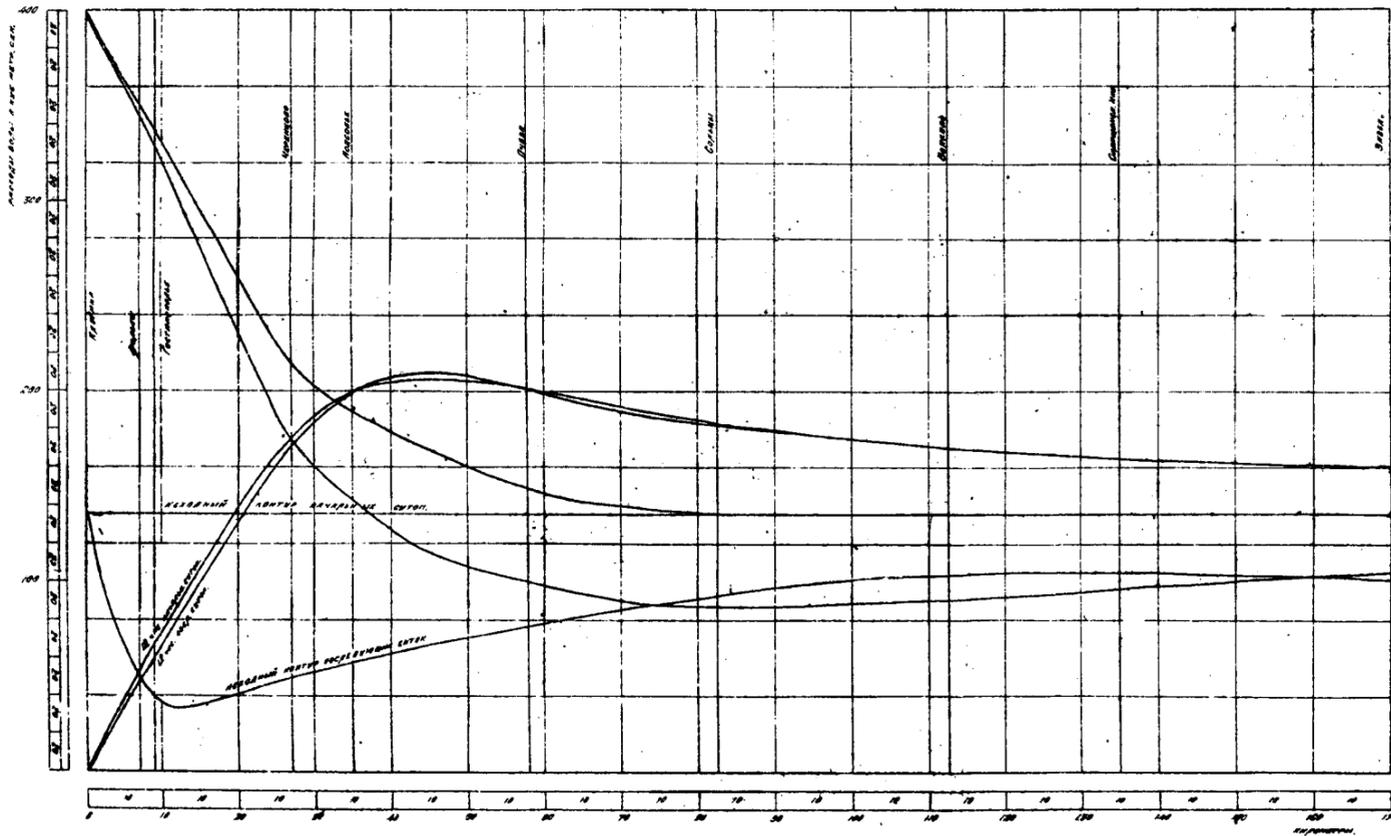
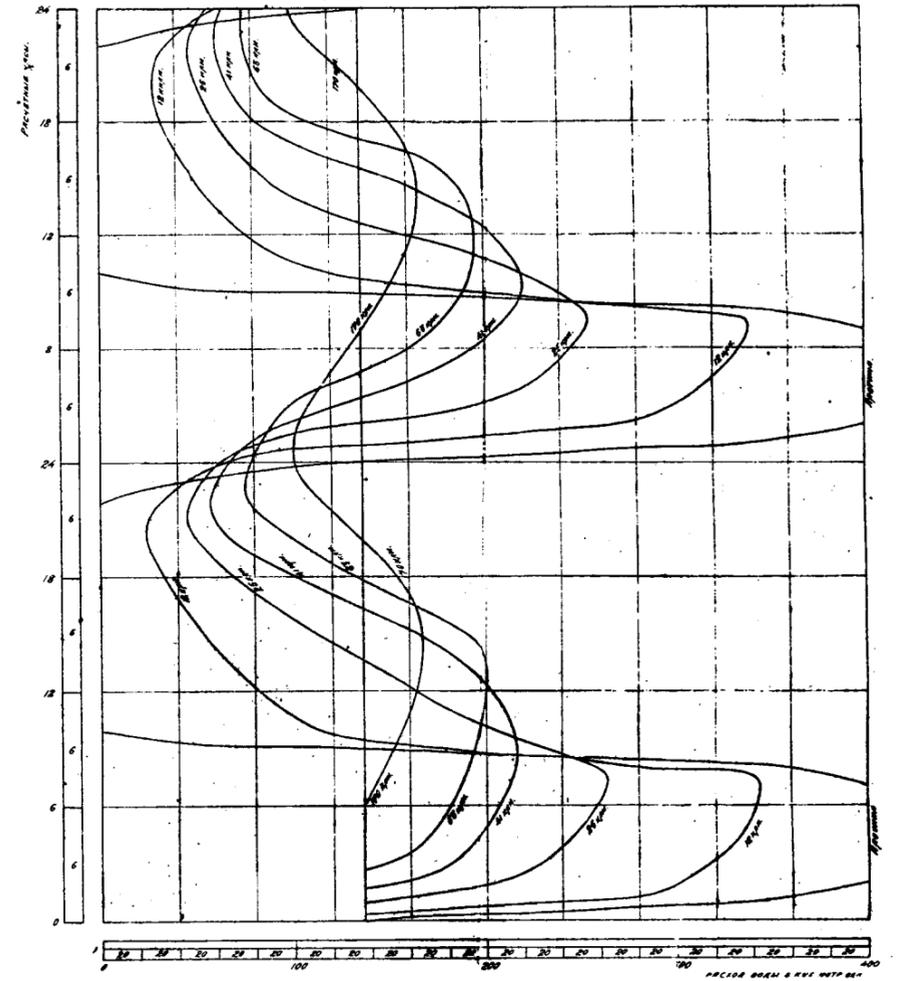
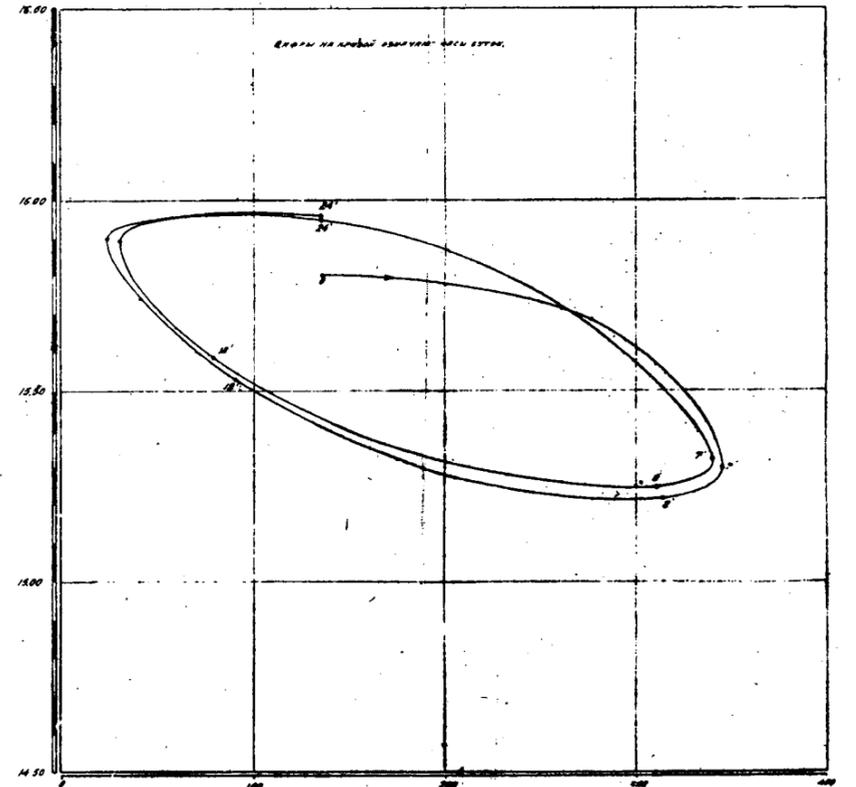


ГРАФИК ПИТАНИЯ.

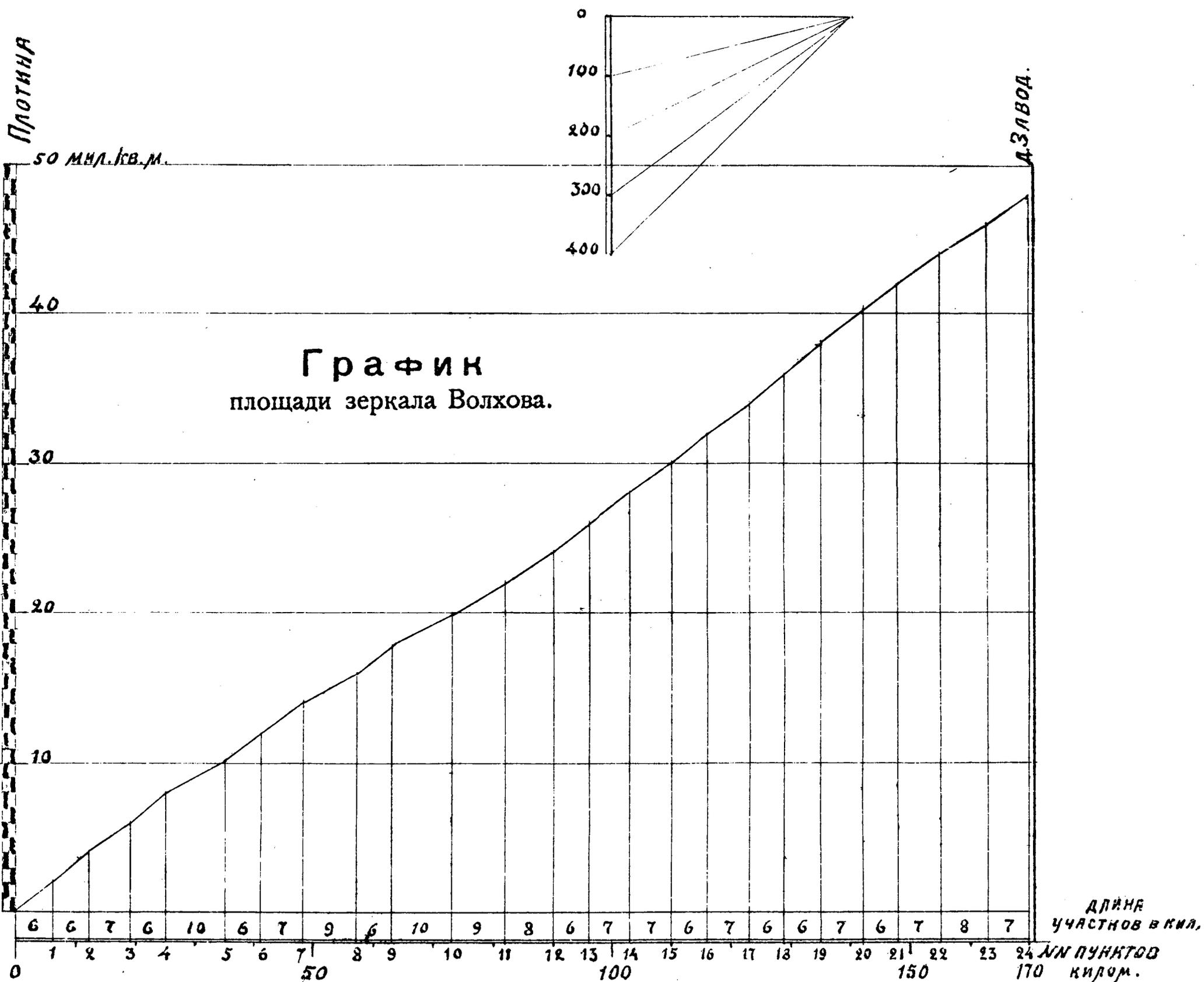


КРИВАЯ РАСХОДА.

ГОСТИНОЛЬСЬКАЯ.



МАСШТАБ ШИРИНЫ РЕКИ В МЕТРАХ



	ЦЕНЫ: (без пересылки)
Выпуск V. Инженер <i>Лоттер, Г. К.</i> — Изыскания на пойме р. Волхова (отчет о работах 1922 г.). <i>Гурьев, В. М.</i> — Прецизионная нивелировка. 188 стр. с 11 приложениями. 1925 г.	4 р. — к.
Выпуск VI. Инженер <i>Вальман, В. Н.</i> — Гидролого-гидрометрические исследования р. Волхова. 290 стр. с 45 графич. приложениями в виде атласа. 1926 г.	10 р. — к.
Выпуск VII. <i>Соколов, Н. Н.</i> , под редакцией проф. <i>Прасолова, Л. И.</i> — Геоморфологический очерк района р. Волхова и оз. Ильмень. 360 стр. с картами и 29 рис. и чертежами. 1926 г.	9 р. — к.
Выпуск VIII. Инженер <i>Лоттер, Г. К.</i> — Исследования поймы озера Ильмень (работы 1923 г.), <i>Никифоров, Н. М.</i> и инженер <i>Глаголев.</i> — Триангуляция на пойме озера Ильмень. Инженер <i>Иванов, П. В.</i> — Исследования истока р. Волхова. 210 стр. с 18 таблицами и графическими приложениями. 1926 г.	6 р. — к.
Выпуск IX. <i>Алабышев, В. В.</i> , <i>Овчинников, П. Н.</i> и <i>Степанов, Е. С.</i> — Геоботаническое описание поймы р. Волхова, под редакцией проф. <i>Ганешина, С. С.</i> 552 стр. с картой и 10 графич. приложений.	15 р. — к.
Выпуск X (ч. 1). <i>Домрачев, П. Ф.</i> и <i>Правдин, И. Ф.</i> — Рыбы озера Ильменя и р. Волхова и их хозяйственное значение. <i>Рылов, В. М.</i> — Планктон оз. Ильменя. <i>Домрачев, П. Ф.</i> — Гидрологический очерк оз. Ильменя. 428 стр., с 22 табл. и 1 картой. 1926 г.	9 р. — к.
Выпуск XI. <i>Эльстер, А. Ю.</i> — Речной сток в Волховском бассейне. 209 стр., с 7 рис. в тексте и 15 графич. приложений. 1925 г.	4 р. 50 к.
Выпуск XII. Инженер <i>Лоттер, Г. К.</i> — Нивелировки отдела Изысканий и ведомости реперов. 160 стр. и карту. 1926 г.	4 р. 10 к.
Выпуск XIII. Инж. <i>Калинович, В. Ю.</i> — Гидрометрические работы на притоках оз. Ильменя. Около 200 стр. и 35 графических приложений.	9 р. — к.
Выпуск XVII. Инж. <i>Бернадский, Н. М.</i> Суточное регулирование расхода Волхова на Волховской Силовой Установке (ок. 4 печ. лист., с граф. прилож.).	2 р. — к.
Атлас р. Волхова и его поймы. 56 листов.	30 р. — к.

Цена 2 р.

Печатаются следующие выпуски:

- Выпуск X (ч. 2, второй полутом). *Долрачев, П. Ф.*—Промышленно-экономическая характеристика р. Волхова и оз. Ильменя; *Его же*—Биологическая оценка продуктивности оз. Ильменя; *Его же*—Общие выводы рыбохозяйств. исследов. р. Волхова и оз. Ильменя; *Приложение*—Свод статистич. сведений о рыбном промысле р. Волхова и оз. Ильменя. Ок. 150 стр., с 24 табл., фот. и диагр.
- Выпуск XIV. Инж. *Иогансон, Е. И.*—Зимний режим р. Волхова. Около 180 стр. и 15 графических приложений.
- Выпуск XV. Инж. *Вальман, В. Н.*—Водомерные наблюдения 1921—1926 г.г. по Волхово-Ильменскому бассейну, около 18 печ. листов, с картою.
- Выпуск XVI. Проф. *Прасолов, Л. И.* и *Соколов, Н. Н.*—Почвенные исследования поймы Волхово-Ильменского бассейна, ок. 25 печ. лист., с граф. прилож.
- Выпуск XVIII. Инженеры *Родевич, В. М.*, *Шрейбер, В. Н.*, *Никифоров, Н. М.* и *Федосеев, Б. Н.*—Отчет об исследованиях притоков оз. Ильменя 1924 г., очерк р. Ловати и Мстинских водохранилищ и общие сведения о работах Отдела Изысканий Волховск. Строительства со сводными данными производ. исследований (1921—1926 гг.), ок. 150 стр., с графич. приложениями.
- Выпуск XIX. *Ануфриев, Г. И.* и *Степанов, Е. С.*—Заключит. выводы по геоботан. исследов. Волхово-Ильм. бассейна. Хозяйств. оценка лугов, ок. 200 стр., с графич. приложениями.
- Выпуск XX. Инж. *Порывкин, Н. П.*—Режим грунтовых вод поймы р. Волхова, ок. 9 печ. лист., с граф. прил.
- Выпуск XXI. *Иогансон, Е. И.*—Кривые подпора по р. Волхову. Теория и наблюдение, ок. 120 стр., с графич. приложениями.
- Выпуск XXII. Инж. *Иванов, П. В.*—Регулирование стока р. Волхова, ок. 18 печ. лист., с графич. прилож.
- Атлас оз. Ильмень и его поймы. 29 листов.
- Атлас Почвенно-ботанический, пойм р. Волхова и оз. Ильменя. 31 лист.

