

Г. К. ЛОТТЕР

**ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ
РАСЧЕТЫ
ДЛЯ ГИДРОСТАНЦИЙ**

ОНТИ • 1937

Г. К. ЛОТТЕР

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ГИДРОСТАНЦИЙ

С. С. М. М. М. М.



ОНТИ НКТП СССР

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Ленинград 1937 Москва

АННОТАЦИЯ

Предлагаемая книга дает сжатое, но достаточно полное изложение вопросов водяного хозяйства гидростанций. В ней приводятся водохозяйственные расчеты при отсутствии и при наличии регулирования стока.

Книга предназначена в качестве пособия для студентов гидротехнических вузов и для инженеров, проектирующих гидростанции.

Ответственный редактор *С. Ф. Савельев*

Технический редактор *С. Вололагина*

Корректор *М. Г. Митрофанов*

Сдана в набор 9/X 1937 г.

Изд. № 175.

Подписана к печати 27/XI 1937 г.

Формат 60X92 Изд. № 175 Печатных листов $5\frac{1}{2}$

Бум. л. $2\frac{3}{4}$ Колич. зн. в 1 бум. л. 116 000

Ленгорлит № 5744

Тираж 2 500

Уч.-авт. л. 6,44

Заказ №2464

I. ВВЕДЕНИЕ.

§ I. Сущность задачи при проектировании водного хозяйства.

Нет такой отрасли народного хозяйства, которая не была бы заинтересована в той или иной мере в воде. Эта мысль внедряется не только в технические, но и в широчайшие массы трудящихся, и источники воды причисляются к ценнейшему народнохозяйственному инвентарю: их изучают, сведения о них систематизируются и затем используются на службу социалистическому строительству.

Каждое заинтересованное в воде хозяйство является водопользователем и, естественно, стремится прежде всего обеспечить свои интересы, не считаясь иногда с потребностями других таких же водопользователей. При плановости народного хозяйства такая постановка нетерпима, так как в итоге может привести к весьма плачевным результатам. Случаи планирования новых промышленных предприятий и реконструкция действующих в зависимости от наличия воды не единичны, и в качестве примеров в СССР может быть указано на Донбасс и Урал.

Расположенные в долинах водотоков предприятия и хозяйства, а также и водный транспорт заинтересованы не только в количестве протекающей воды, но также и в ее высотном положении, так как изменение уровней воды отражается не только на глубинах водотока и габаритах мостов и других пересекающих реку сооружений, но также и на положении уровня грунтовых вод. Чрезмерный подъем воды может иметь следствием значительные затопления и заболачивания ценных в сельскохозяйственном и промышленном отношении земель, и величина сопряженных с этим убытков может привести к необходимости ограничить величину подпора.

Изложенное в достаточной мере освещает вопрос о том, с какой тщательностью и осторожностью необходимо подходить к решению задачи использования водотока, в особенности в том случае, если в его воде заинтересован ряд водопользователей.

Интересы всех их необходимо увязать: выявить и проверить потребное им количество воды и сопоставить общую потребность в воде с природной водоносностью используемого источника. При недостаточной водоносности потока из всех претендующих на воду потребителей приходится оставлять только наиболее рентабельных и важных по своей значимости, руководствуясь при этом указаниями краевых и центральных плановых органов. Для определения суммарной потреб-

№ п/п	Наименование потребителей	Потребность в воде по месяцам и за весь год в м ³ /сек												
		Ян- варь	Фев- раль	Март	Ап- рель	Май	Июнь	Июль	Ав- густ	Сен- тябрь	Ок- тябрь	Но- ябрь	Де- кабрь	Средняя за год
1	Водный транспорт	—	—	—	—	25 (с15/V)	25	25	25	25	25	—	—	11,46
2	Промышленное во- доснабжение . . .	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	Ирригация	—	—	—	54,5	30,5	49,5	28,0	10,0	—	—	—	—	14,4
Всего потребно .		2,5	2,5	2,5	57,0	58	77	55,5	37,5	27,5	27,5	2,5	2,5	28,36

ности в воде составляется ведомость по образцу, указанному в табл. 1.

Таким образом основной задачей водохозяйстве иного проектирования являются выявление потребности в воде и решение вопроса, насколько эта потребность может быть используемым водотоком удовлетворена, причем конечной целью явится составление плана водопользования.

В дальнейшем будем называть целевым водопользованием такое, при котором в воде заинтересован только один потребитель, например водный транспорт, энергетика, промышленность, ирригация и т. д. При заинтересованности в воде нескольких потребителей будем говорить о комплексном водопользовании.

Обычно объектом использования является какая-либо одна река или озеро (вернее бассейн), однако при недостатке воды не исключена возможность приключить к используемому бассейну другой, направив сток его в нужном направлении. Такие проекты переключения бассейна не являются редкостью, и в качестве примеров могут быть названы проекты: переключение стока озер Лаче и Кубенского к Волге, направление стока р. Дона к Волге, Чирка-Кеми — к Выгу, части стока В. Волги — к Явони и др.

Выше было указано, что для водохозяйственного проектирования являются обязательными сравнение водоносности используемого водотока с потребностью в воде и такая наметка водохозяйственного плана необходима, чтобы спрос на воду в возможной мере был удовлетворен (рис. 1).

Для уяснения дальнейшего изложения остановимся несколько на

общей характеристике естественного режима водотоков. Ознакомление с режимом речного стока позволяет установить, что величина расхода является переменной не только в годовом, но также в вековом разрезе. По величине годового стока различают годы многоводные, средние и маловодные. В течение каждого года имеются периоды, обильные и бедные водой. Для рек, питающихся атмосферными осадками, наиболее многоводным является период весеннего таяния, наиболее бедным — зима, когда река живет только за счет грунтового питания. При ледниковом питании паводок сдвигается к летнему периоду.

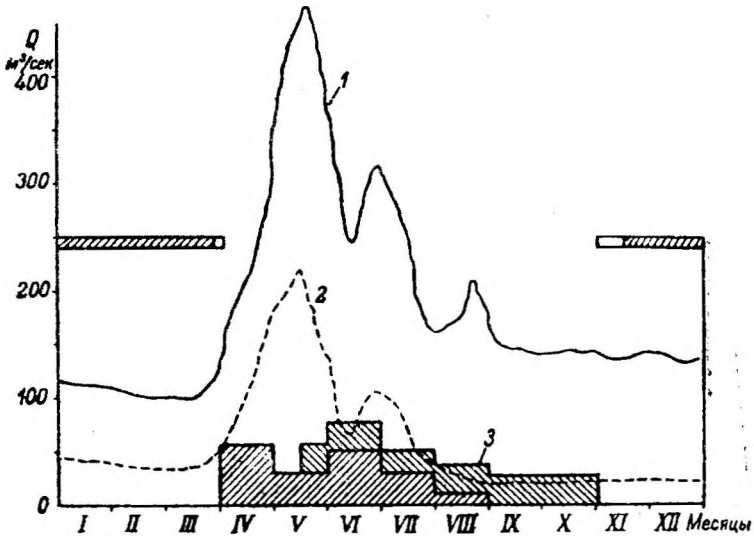


Рис. 1. Графики расходов: естественных в реке и потребляемых водопользователями.

1—многоводный год; 2—маловодный год; 3—суммарные расходы водопользования.

Осенние обложные дожди нередко вызывают половодья, иногда не уступающие весеннему. Для горных рек большое значение могут иметь ливни.

Неравномерность стока характеризуется следующими отношениями:

$$\frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}, \frac{q_{\text{ср}}}{q_{\min}}, \frac{q_{\max}}{q_{\text{ср}}}, \frac{q_{\max \max}}{q_{\min \min}}, \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}, \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\min}}, \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{ср}}}$$

Входящие сюда величины имеют следующие значения:

Q_{\max} — наибольший }
 Q_{\min} — наименьший } из среднегодовых расходов
 $Q_{\text{ср}}$ — средний многолетний расход

q_{\max} — наибольший расход }
 q_{\min} — наименьший „ } одного года
 $q_{\text{ср}}$ — среднегодовой „ }

$q_{\max \max}$ — наибольшим „ расход }
 $q_{\min \min}$ — наименьший „ } за все годы

На указанные отношения имеют влияние гидрографические характеристики бассейна. Так с увеличением коэффициента озерности приведенные соотношения выравниваются.

Если в период маловодья имеется недостаток в воде, а во время полноводья — избыток, то естественно возникает мысль искусственно, путем технического воздействия на природу, так перераспределить сток, чтобы в любое время потребность в воде была обеспечена.

Такое искусственное перераспределение стока и управление им сообразно предъявляемым водопользователями требованиям носят название регулирования стока.

Искусственный или природный резервуар-водоем, в котором задерживается излишек воды многоводного периода, называется водохранилищем. Очевидно, что в работе водохранилища могут быть намечены два периода: первый — наполнения, в течение которого приток воды больше потребления, а второй — сработки, когда естественный сток недостаточен для удовлетворения потребности водопользователей и для покрытия спроса приходится расходовать запасы водохранилища.

Объем водохранилища, расположенный ниже наинизшего уровня воды в нем, является для резервирования стока бесполезным, и именуется мертвым, объем же, расположенный между наинизшим и наивысшим уровнями, является полезным и определяет размеры и характер регулирования.

Если водохранилище имеет полную емкость, достаточную для накопления излишков многоводных лет для расходования скопленных вод в течение ряда маловодных лет, то такое регулирование будет многолетним. Если емкость такова, что накопленные в ней запасы воды расходуются в течение одного года, то будет иметь место годовое регулирование стока.

При расходовании запасов воды водохранилища в течение части года можно говорить о сезонном, месячном, недельном регулировании. Если потребление воды в течение суток не остается постоянным и в некоторые часы превышает наличный среднесуточный расход в реке, то может возникнуть необходимость перераспределить суточный сток так, чтобы удовлетворить спрос на воду полностью. Такое перераспределение стока именуется суточным регулированием.

Остановимся теперь несколько на требованиях отдельных основных водопользователей.

Потребности в воде водного транспорта ограничиваются навигационным периодом. При шлюзованном водотоке потребности ограничиваются расходом воды на шлюзование и неизбежными потерями на фильтрацию и испарение. Количество воды определяется емкостью сливной призмы (в шлюзах) и числом шлюзований. При наличии свободных участков реки минимальный расход определяется необходимостью поддерживать требуемые глубины в наиболее затруднительных для судоходства и сплава местах. Длительность навигационного периода в результате регулирования не должна сокращаться.

Для ирригации вода необходима в течение вегетационного периода; количество ее определяется родом выращиваемых культур и общими климатическими условиями района, причем в засушливые годы потребность в воде возрастает.

Потребности в воде гидростанций определяются графиком покрываемой нагрузки. Как правило, можно указать, что потребность энергии в зимнее время, наиболее бедное водой, больше, чем в летнее.

Промышленность, в том числе и тепловые станции, предъявляют требование на более или менее равномерное снабжение водой в течение всего года.

Таким образом можно установить, что требования на воду со стороны основных потребителей водного транспорта, ирригации и энергетики не совпадают, и при комплексном водопользовании наиболее затруднительна увязка именно этих трех водопользователей.

§ 2. Исходные данные при водохозяйственном проектировании.

Первоначальными исходными данными для водохозяйственных расчетов являются:

1. Потребности в воде отдельных водопользователей, систематизированные в хронологическом порядке. Если потребность в воде зависит от климатических особенностей отдельных лет, то это в собираемых данных должно быть отражено. Сведения о воде, необходимой существующим или проектируемым водопользователям, с учетом их возможного расширения, обычно являются решающими для дальнейшего использования водотока.

Так, например, при разработке проекта водоснабжения Ганджинского района от ряда источников пришлось отказаться, потому что вода их почти что целиком разбирается на орошение.

При разработке схемы использования озера Севан, вопросу об увязке интересов ирригации и энергетики было посвящено большое внимание, и водопользование разработано с учетом принятого распределения воды между этими главнейшими потребителями.

2. Сведения о естественном режиме используемого водотока. Данные эти представляются в табличной и графической форме в виде гидрографов за отдельные годы.

Если составить суммарный календарный график потребности в воде всех водопользователей кроме энергетики и этот график наложить на гидрограф используемого водотока, то разность ординат обоих графиков даст свободный остаток воды для энергетического использования (рис. 1).

Сопоставляя календарный график свободного остатка воды с количеством воды, потребным для энергоснабжения, можно решить вопрос, насколько рассматриваемый водоток по водоносности является удовлетворительным, необходимо ли регулирование стока или же потребители энергии могут быть удовлетворены использованием стока при естественном режиме. В большинстве случаев регулирование стока оказывается желательным. Схема использования водотока не остается без влияния на водохозяйственные расчеты.

В речной схеме учету подлежит только вода, забираемая иными водопользователями (кроме энергетики) выше створа плотины. Водный транспорт из имеющегося расхода воды претендует только на воду для шлюзования плотоходов и бревноспусков. При деривационной

схеме вопрос обстоит несколько сложнее. Водой должны быть обеспечены все потребители, заинтересованные также участком между головным сооружением и отводящим каналом здания станции. Претензии на воду со стороны водного транспорта будут зависеть от того, предназначен ли деривационный канал также и для транспортных целей или судоходство и сплав продолжают пользование руслом реки и непосредственно ниже головного узла. В деривационной схеме не должно оставить без внимания расход, потребный для промыва осевших наносов.

Для решения вопросов о регулировании стока необходимо располагать топографическими данными для районов, в которых возможно устройство водохранилищ. На основании этих данных должна быть

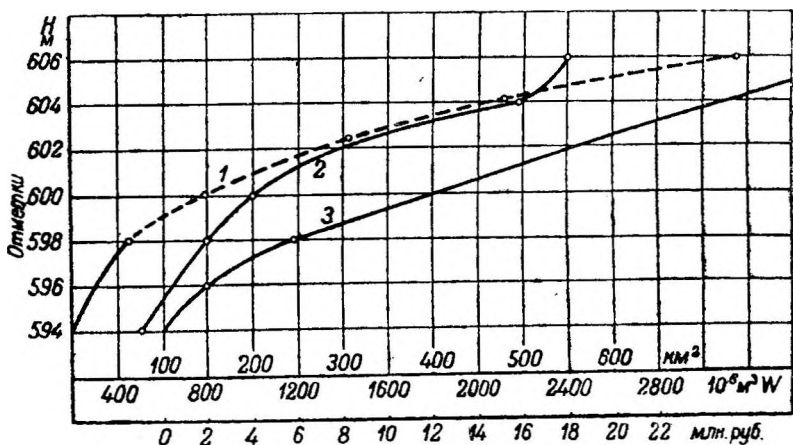


Рис. 2. Кривые зависимости площадей и объемов водохранилища от отметок.

1—кривая объемов; 2— кривая площадей; 3— кривая стоимости отчуждений.

построена зависимость площадей и объемов водохранилищ от отметок (рис. 2). Не менее важными, особенно для освоенных районов, являются сведения о стоимости затопляемых и заболачиваемых угодий. Данные эти должны быть также нанесены на графике зависимости площадей, объемов и отметок.

Так как при устройстве водохранилищ горизонт воды повышается, то с этим связаны неизбежные потери воды из водохранилищ. Потери эти слагаются из: потерь на фильтрацию, на испарение и на ледообразование. Оценка этих потерь в количественном отношении требует сведений о геологической структуре чаши будущего водохранилища, величине испарений со свободной поверхности воды и, наконец, о толщинах льда. Все эти данные могут быть получены в результате постановки соответственных наблюдений.

Таким образом для составления проекта водопользования необходимо располагать следующими данными (табл. 2):

№ п/п	Наименование данных и материалов	Целевое назначение	Примечание
1	Сведения о потребности в воде всех водопользователей кроме энергетики	Для увязки и определения суммарного потребного расхода	Все данные должны быть представлены окончательно обработанными, с соответствующими выводами
2	Водомерные графики, кривые расхода, гидрографы используемого водотока в створе забора воды и створе плотины водохранилища	Для окончательной увязки всех водопользователей и установления свободного стока для энергетики	
3	Топографические материалы по водохранилищам и водотокам, отводящим из них воду до заборных сооружений	Для выбора емкости водохранилища	
4	Данные экономические исследований в районе затоплений	Для оценки стоимости затоплений при создании водохранилища	
5	Данные метеорологических наблюдений	Для подсчета потерь и в случае надобности и для подсчета стока	
6	Результаты геологических исследований	Для выбора мест под сооружения, назначения предельных горизонтов воды и подсчетов потерь	

§ 3. Гидроэнергетические характеристики, полученные в результате водохозяйственного проектирования.

Выбор мощности гидроустановки производится на основании графика мощности водотока и графика нагрузки. Оба графика должны быть, отнесены к шинам гидростанции.

Таким образом при энергетическом использовании потока должен быть построен хронологический график мощности водотока, который совместно с графиком нагрузки позволил бы установить наиболее выгодную мощность проектируемой гидростанции.

Мощность N водотока на шинах гидростанции определяется в киловаттах выражением:

$$N = \frac{1000}{75} Qh\eta_r\eta_T \cdot 0,736 = 9,8\eta_r\eta_T Qh, \quad (1)$$

где

Q — расход воды в реке в м³/сек;

h — напор нетто в метрах;

η_r — коэффициент полезного действия генератора;

η_T — коэффициент полезного действия турбин.

Для предварительных подсчетов можно принять, что $\eta_T = 0,85$ а не зависит от колебания напора, а $\eta_T = 0,95$.

При этих величинах формула (1) принимает вид:

$$N = 8Qh \text{ киловатт.} \quad (2)$$

Так как Q и h являются функциями времени, то и мощность водотока является во времени также переменной, т. е.

$$N = f(t).$$

Для возможности выяснения вида функции $N = f(t)$ необходимо ее построить в виде хронологического графика, для чего в качестве вспомогательных являются хронологические графики расходов $Q = F(t)$, водомерные графики верхнего и нижнего бьефа и, наконец, график изменения напора $h = \varphi(t)$. Хронологический график $N = f(t)$ получают простым перемножением величин соответственных ординат зависимости, пользуясь при этом равенством (2).

Имея хронологические графики мощности, расходов и напоров, можно таковые перестроить на графики длительности. Графики длительности должны быть построены как для целого года, так и для характерных сезонов. Характерных сезонов различают три: период, свободный от льда, период ледохода и период ледостава.

Если гидрологические данные имеются за целый ряд лет, то и графики длительности строятся за этот же ряд лет, и затем из них, как производные, путем деления суммарной длительности на число лет периода, получают среднегодовые графики. Указанные графики являются результативными и используются в дальнейшем для энергетических расчетов.

Кроме отмеченного выше, водохозяйственным проектированием устанавливаются наибольшие расходы, которые берутся в основу проектирования отверстий гидротехнических сооружений.

II. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ОТСУТСТВИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА.

§ 4. Методика расчета.

При отсутствии регулирования водопользование базируется на естественном стоке, и задача решается на основании рассмотрения гидрографов используемого водотока и хронологического графика потребности в воде всех водопользователей кроме энергетики, забирающих воду выше водоприемных сооружений гидростанции (табл. 1). Здесь и в дальнейшем считается, что заявки на воду всех водопользователей увязаны и согласованы, и таким образом для гидроэнергетического использования рассматривается лишь свободный остаток воды. Это имеет значение для определения величины расхода. Однако так как при водохозяйственном проектировании важно установить также и величину напора, зависящую от отметки нижнего бьефа, то для установления этой отметки необходимо считаться с полным расходом, поступающим как через гидростанцию и плотину, так и через все сооружения обслуживающих других водопользователей. Например: в реке имеется расход 800 м³/сек, на шлюзование идет 40 м³/сек, на бревноспуск — 15 м³/сек, на ирригацию — 150 м³/сек, расчетный расход для мощности водотока будет 595 м³/сек, для определения же отметки нижнего бьефа — 650 м³/сек.

Отметки верхнего бьефа устанавливаются условиями пропуска расхода воды через плотину.

Имея хронологические графики расходов, уровней верхнего и нижнего бьефа, а следовательно и напоров, представляется возможным построить и хронологический график мощности водотока, пользуясь при этом формулой (2).

Обычно все указанные построения и вычисления можно ограничить для характерных лет, и только для стадии окончательного проекта ряд исследуемых лет расширяется.

При водохозяйственном проектировании в зависимости от наличия гидрометрических данных может встретиться несколько случаев:

1) гидрометрические данные имеются за длительный ряд лет (например, реки Свирь, Волхов, Мета, Днепр и др.);

2) гидрометрические данные за навигационный период имеются за длительный ряд лет, за зимний же период данные имеются за короткий ряд лет (судоходные реки на большинстве водомерных постов);

3) гидрометрические данные имеются за короткий ряд лет (ряд рек Севера, Кавказа, Сибири, Алтая и др.);

4) гидрометрические данные имеются только спорадические (большинство несудоходных рек).

Методология водохозяйственных расчетов для всех этих случаев, не меняется, причем установление необходимых данных для случаев 2—4 производится методами инженерной гидрологии.

§ 5. Выбор расчетных лет.

Выше было указано, что все водохозяйственные вычисления и построения можно ограничить для характерных (расчетных) лет. В гидрологии характерные годы определяются величиной как годового, так и сезонного стока.

По величине годового стока годы разделяются на: катастрофически многоводные (один из 100)¹, многоводные (один из 10), средние, маловодные (один из 10), катастрофически маловодные (один из 100). При выборе этих лет, а в особенности среднего года, при наличии достаточного материала следует всегда исходить из реальных гидрографов и подбирать годы таким образом, чтобы они обладали указанными выше характеристиками или близкими к ним.

По величине сезонного стока годы различают: по величине весеннего паводка, осеннего половодья и зимнего стока.

При водохозяйственном проектировании анализу подлежат все перечисленные годы. Здесь следует отметить, что наиболее многоводный год в гидрологическом понимании не всегда будет таковым для энергетики. Это обстоятельство является следствием того, что не вся вода весеннего половодья проходит через турбины ГЭС, и более эффективным по выработке энергии может оказаться год со значительным осенним половодьем.

§ 6. Некоторые указания для определения величин расходов и стока при недостатке гидрологических данных.

Недостаток места не позволяет уделить должного внимания вопросу об определении величин расходов и стока при недостатке непосредственных гидрометрических наблюдений, почему ограничимся лишь краткими указаниями для некоторых, наиболее часто встречающихся случаев.

Для решения большинства возникающих задач необходимо располагать метеорологическими данными за возможно больший ряд лет: об осадках, температурах и влажности воздуха, и по этим данным вычислить дефициты влажности. В дальнейшем рассмотрим отдельные частные случаи:

а) Определение зимних расходов при наличии длительного ряда наблюдений за навигационный период и короткого — за полный год. В этом случае могут

¹ Для особо ответственных сооружений в качестве катастрофически многоводного следует принимать один из 200.

быть два подслучая: первый—водомерные наблюдения имеются за полные годы всего ряда лет наблюдений, а наблюдения расходов — только за короткий ряд, и второй — и колебания уровней и расходы наблюдались в течение короткого ряда лет.

Если характер зимнего режима водотока таков, что для периода наличия на водотоке ледяного покрова получается закономерная кривая связи между уровнями и расходами, то задача для первого подслучая решается просто на основе установленной кривой зимних расходов. Если же кривой зависимости между уровнями и расходами не получается, то для периода непосредственных наблюдений для каждого зимнего месяца устанавливают средние отношения между средне-месячным зимним расходом и расходом, определенным по летней кривой расходов для среднего уровня рассматриваемого месяца, причем в уровни должны быть введены поправки за счет закорных явлений. Имея эти отношения, возможно без затруднений определить средне-месячные зимние расходы за весь период лет. Другой прием заключается в том, что за годы фактических наблюдений определяется в процентах отношение зимнего стока ко всему годовому стоку. Зная это отношение, не представляет затруднений для всех лет подсчитать зимний сток и соответствующий ему средне-зимний расход.

Календарное распределение зимних расходов принимается по линейному закону, начиная от средне-месячного предзимнего периода. Наконец, по третьему способу можно определить за период фактических наблюдений отношение средне-зимнего расхода или средне-месячных расходов зимнего периода к расходу при устойчивом уровне предзимнего периода и, пользуясь этими отношениями, определить зимние расходы для всех прочих лет.

б) Гидрометрические данные имеются только за короткий ряд лет наблюдений. В этом случае также возможен ряд подслучаев. Прежде всего необходимо установить, является ли период лет непосредственных наблюдений по водности средним, выше или ниже среднего. Положение это может быть установлено либо по анализу данных метеорологических наблюдений (осадки), либо по анализу стока хорошо изученного водотока, расположенного по соседству с используемым и обладающего подобными географо-гидрологическими характеристиками.

При наличии аналога, т. е. хорошо изученного водотока с географо-гидрологическими характеристиками, подобными таковым используемого водотока, задача расширения ряда лет решается путем нахождения коэффициентов пропорциональности для обоих водотоков. Коэффициенты эта устанавливают за период непосредственных одновременных наблюдений на используемом водотоке и выбранном аналоге¹ и сохраняются одинаковыми для всех остальных лет.

Для выяснения экстремных лет следует также воспользоваться методом математической статистики, позволяющим установить теоретический закон распределения и подсчитать кривые обеспеченности.

¹ См. § 17.

Процентное значение обеспеченности.

Коэффициент несимметрии C_s	1	3	5	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	95	97	99	99,9
0,0	2,38	1,87	1,64	1,28	0,84	0,68	0,52	0,25	0,00	-0,25	-0,52	-0,68	-0,84	-1,28	-1,64	-1,88	-2,32	-3,05
0,2	3,38	2,48	1,98	1,30	0,88	0,67	0,51	0,22	-0,03	-0,28	-0,55	-0,70	-0,85	-1,25	-1,58	-1,79	-2,18	-2,81
0,4	3,67	2,62	2,00	1,32	0,82	0,65	0,48	0,19	-0,06	-0,31	-0,57	-0,71	-0,85	-1,22	-1,51	-1,69	-2,08	-2,54
0,6	3,96	2,77	2,06	1,33	0,80	0,62	0,45	0,15	-0,09	-0,34	-0,58	-0,72	-0,86	-1,19	-1,45	-1,59	-1,88	-2,28
0,8	4,25	2,90	2,12	1,34	0,78	0,60	0,42	0,12	-0,13	-0,37	-0,60	-0,73	-0,86	-1,16	-1,38	-1,49	-1,74	-2,03
1,0	4,54	3,03	2,19	1,34	0,76	0,57	0,38	0,08	-0,16	-0,40	-0,61	-0,73	-0,86	-1,12	-1,31	-1,39	-1,59	-1,80
1,2	4,82	3,15	2,25	1,35	0,74	0,54	0,35	0,05	-0,19	-0,42	-0,62	-0,73	-0,85	-1,08	-1,25	-1,30	-1,45	-1,59
1,4	5,11	3,28	2,31	1,33	0,71	0,51	0,32	0,02	-0,22	-0,44	-0,63	-0,73	-0,84	-1,05	-1,18	-1,21	-1,32	-1,40
1,6	5,39	3,40	2,36	1,33	0,68	0,48	0,28	-0,01	-0,25	-0,46	-0,64	-0,73	-0,82	-1,00	-1,11	-1,13	-1,19	-1,24
1,8	5,66	3,50	2,41	1,32	0,64	0,44	0,24	-0,05	-0,28	-0,48	-0,64	-0,72	-0,80	-0,95	-1,03	-1,06	-1,08	-1,11
2,0	5,91	3,60	2,46	1,30	0,61	0,41	0,20	-0,08	-0,30	-0,49	-0,64	-0,71	-0,78	-0,90	-0,95	-0,98	-0,99	-1,00
2,2	6,20	3,70	2,48	1,28	0,58	0,37	0,17	-0,11	-0,33	-0,49	-0,63	-0,69	-0,75	-0,85	-0,90	-0,90	-0,90	-0,91
2,4	6,47	3,78	2,49	1,25	0,54	0,33	0,13	-0,14	-0,35	-0,50	-0,62	-0,66	-0,71	-0,79	-0,82	-0,82	-0,83	-0,83
2,6	6,73	3,87	2,50	1,23	0,51	0,31	0,10	-0,17	-0,37	-0,50	-0,60	-0,64	-0,68	-0,74	-0,76	-0,76	-0,77	-0,77
2,8	6,99	3,95	2,51	1,20	0,47	0,26	0,06	-0,20	-0,38	-0,50	-0,59	-0,62	-0,65	-0,70	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71
3,0	7,25	4,02	2,52	1,18	0,42	0,25	0,03	-0,23	-0,40	-0,50	-0,57	-0,60	-0,62	-0,65	-0,66	-0,66	-0,67	-0,67

Кривые распределения характеризуются двумя коэффициентами: коэффициентом вариации C_v , и коэффициентом несимметрии C_s . Величины C_v и C_s могут быть подсчитаны по следующим формулам:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (k-1)^2}{n-1}}; \quad (3)$$

$$\min C_s = 2C_v; \quad (4)$$

$$\max C_s = \frac{2C_v}{1-k_{\min}};$$

где k — модульные коэффициенты отдельных лет;

k_{\min} — минимальное значение модульного коэффициента;

n — число лет наблюдений.

Кривую обеспеченности можно построить, пользуясь таблицей Фостера отклонений ординат кривых продолжительности от середины в зависимости от C_s (табл. 3) при $C_v = 1$.

Пользоваться табл. 3 надо следующим образом: выписывают значения отклонений ординат из ряда, соответствующего заданному C_s ; все выписанные значения умножают на величину коэффициента C_s ; и результат увеличивают на единицу. Полученные таким образом данные и представляют собой модульные коэффициенты соответственной обеспеченности.

При отсутствии аналога величина среднего многолетнего стока и норма стока устанавливаются по анализу метеорологических данных (осадки) и материалам непосредственных наблюдений. При анализе необходимо определять модули и коэффициенты стока по гидрометрическим материалам и по формуле проф. М. А. Великанова и Д. Л. Соколовского:¹

$$\varphi = 1 - \sqrt{\frac{d}{4,8}},$$

где d — дефицит влажности.

Характерные годы выбираются на основании рассмотрения метеорологических данных (осадки, дефицит влажности) за длительный ряд лет. В качестве контроля или самостоятельного метода применяют построение кривой обеспеченности по данным непосредственных наблюдений, если длительность наблюдений не меньше пяти лет, пользуясь при этом для определения C_v формулой (3); при более коротком ряде лет C_v определяют по выражению:

$$C_c = a - b \lg(F + 1), \quad (6)$$

где

a — климатический параметр;

$b = 0,063$;

F — площадь бассейна в кв. километрах.

Инженером Д. Л. Соколовским составлена карта распределения параметра a в пределах Европейской части СССР,²

¹ Следует иметь в виду, что эта формула для ряда районов (Север. Сибирь часть Урала и др.) дает значительные отклонения.

² Д. Л. Соколовский. Применение кривых вероятностей к расчетам годового и максимального стока. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, 1934.

Для установленных вышеуказанными приемами характерных лет произвести распределение расходов по сезонам и месяцам возможно лишь ориентировочно, пользуясь при этом соотношениями, полученными из лет с непосредственными гидрологическими наблюдениями.

в) Гидрометрические данные имеются только спорадические. Такой случай часто встречается при проектировании промышленного водоснабжения. Для энергетики с ним приходится встречаться главным образом при разработке гипотез использования водотока и сравнительно редко при эскизном и техническом проектировании (например, р. Энгажимо).

Общий план решения следующий:

1. Анализируют метеорологические данные (осадки, дефицит влажности) и устанавливают средние многолетние величины (нормы).

2. Определяют коэффициент стока по формуле (5) и затем по средне-многолетнему слою осадков норму стока (модуль). Проверкой могут служить данные для исследованных рек, расположенных в рассматриваемом районе.

В. Сезонное и месячное распределение стока может быть сделано только по аналогии с исследованными реками, обладающими хотя бы примерно близкими географо-гидрологическими показателями.

Экстренные годы могут быть намечены по метеорологическому ряду или по кривой обеспеченности, построенной для C_p , подсчитанного по формуле (6).

Для облегчения решения задачи приведем для некоторых рек распределение сезонного стока для среднего года в процентах от годового (табл. 4).

Таблица 4

Сезонный сток в процентах от годового

№ п/п	Наименование рек	Весна	Лето — осень	Зима	Год
1	Топорован	29,0	52,2	18,8	100
2	Сяндалка	30,6	33,4	36,0	100
3	Мета	49,5	28,5	22,0	100
4	Волхов	50	27,0	23,0	100
5	Свирь	31	37	32	100
6	Упа	76,8	12,2	11,0	100
7	Ога (Калуга)	63	20,6	16,4	100
8	„ (Орел)	74	14,6	11,4	100
9	Волга (Ярославль)	59,5	22,5	18,0	100
10	„ (Вязовые)	59,5	22,5	18,0	100
11	Миасс	55,2	35,0	9,8	100
12	Витим (Бодайбо)	57	38	5	100
13	Алдан (Томмот)	52,9	36,5	10,6	100
14	Уба	73,0	20,0	7,0	100
15	Тертер (Кавказ)	48,0	29,5	22,5	100

Имея сезонное распределение стока, представляется возможным построить кривую длительности расходов, сперва ступенчатую по сезонам, а затем, пользуясь данными о максимальном и минимальном расходах, и более подробную.

Наименьший расход может быть предварительно оценен в 25—50% от среднезимнего расхода.

Метод определения наибольшего, так называемого катастрофического, расхода зависит от степени изученности реки. При достаточной степени изученности наибольшие расходы могут быть определены по непосредственным данным наблюдений уровней и расходов; при краткосрочном периоде наблюдений или полном отсутствии таковых приходится прибегать к методам аналогий с соседними изученными водотоками и к эмпирическим формулам.

Величина и происхождение наибольших расходов зависят, кроме метеорологических факторов, от географического положения водотока и площади его бассейна. Так, на основании наблюдений может считаться, что для северной и, отчасти, средней полосы Европейской части СССР (повидимому, это относится также и к Сибири, за исключением ее горных участков) наибольшие расходы даже для рек со сравнительно малыми площадями бассейна имеют место для периода весеннего таяния снегов. Для южных районов и горных рек, в особенности небольших бассейнов, наибольшие расходы связаны с ливнями, Инж. Д. И. Кочерин указывает, что для Московского района превышение ливневых максимумов над весенними снеговыми наблюдалось для площадей бассейна 15—20 км², для широты Оки (Серпухов — Рязань) — для площадей до 50 км², для южной же полосы — на площади даже до 2000 км².

Для хорошо изученных водотоков наибольшие расходы определяют по наивысшему, установленному наблюдениями или опросом, горизонту воды (г. в.), пользуясь для этого кривыми расхода.

Контролем также могут служить определения максимальной возможного расхода на Фуллере или же по методу математической статистики.

По Фуллеру

$$Q_{\max} = kF^{0,8} (1 + 0,8 \lg T), \quad (7)$$

где Q_{\max} — наибольший среднесуточный расход за период лет T

(например 100, 1000) ф³/сек (1 ф³/сек = 0,0288 м³/сек);

F — площадь бассейна реки в кв. милях (1 км² = 0,386 кв. мили);

k — коэффициент, зависящий от топографических и гидрологических условий бассейна.

Для определения k можно воспользоваться равенством (7) для наибольшего расхода за период наблюдения T_L лет. Тогда из равенства (7) получаем:

$$k = \frac{Q'_{\max}}{F^{0,8}(1 + 0,8 \lg T_L)}$$

Возможный мгновенный максимальный расход находится по Фуллеру из равенства:

$$Q_{Mz} = Q_{\max} (1 + 2T^{1-0,3}). \quad (7a)$$

По методу математической статистики анализ может быть произведен двояко:

1) Выписывают за все годы наблюдения наибольшие в году расходы, вычисляют среднюю величину, подсчитывают модульные коэффициенты $k = \frac{Q_i}{Q_{cp}}$ и по ним вычисляют C_v и C_s .

По определенным коэффициентам вариации и несимметрии C_s строят кривую распределения, пользуясь табл. 2, и по выбранному проценту обеспеченности определяют соответственный модульный коэффициент. а следовательно, и расход

$$Q_{\max} = k_{\max} \cdot Q_{\text{ср}}$$

2) Выбирают для каждого года все характерные паводки (не случайные пики во время нарастания паводка или его спада) и отвечающие им наибольшие расходы. По полученным для всех лет данным вычисляют средний из всех наибольших расходов и дальнейшее вычисление ведут так же, как и в первом случае.

При наличии небольших паводков, второй прием дает всегда уменьшенные результаты, вследствие чего можно рекомендовать пользование вторым приемом, только при условии контрольной проверки по первому.

При кратком периоде лет, помимо непосредственного определения величины максимального расхода, следует произвести вычисления также по косвенным методам и эмпирическим формулам.

За последнее десятилетие появилось несколько ценных работ инж. Д. И. Кочерина, посвященных максимальным расходам. Предложенные им формулы для определения величин максимального расхода для разных районов Европейской части СССР приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ п/п	Наименование районов	q_{\max} м ³ /сек
1	Северный район	$q_{\max} = \frac{1,43}{F^{0,112}} - 0,28$
2	Северо-восточный район	$q_{\max} = \frac{1,66}{F^{0,123}} - 0,26$
3	Унженско-Ветлужекский район	$q_{\max} = \frac{1,68}{F^{0,143}} - 0,28$
4	Северное Заволжье	$q_{\max} = \frac{2,06}{F^{0,144}} - 0,28$
5	Московский район	$q_{\max} = \frac{2,82}{F^{0,148}} - 0,42$
6	Западный район	$q_{\max} = \frac{2,88}{F^{0,236}} - 0,13$
7	Средняя полоса (лесостепь)	$q_{\max} = \frac{3,35}{F^{0,235}} - 0,15$
8	Юг и Юго-запад	$q_{\max} = \frac{3,57}{F^{0,288}} - 0,07$

Для ливневого стока южной ПОЛОСЫ Д. И. Кочерин рекомендует формулы:

$$q_{\max} = \frac{35,8}{F^{0,458}} - 0,8 \quad (8)$$

и для Крыма:

$$q_{\max} = \frac{31,53}{F^{0,488}} - 1,53. \quad (9)$$

В этих формулах:

q_{\max} — максимальный модуль стока в м³/сек;

F — площадь бассейна в кв. километрах.

Для районов, не охваченных работами Д. И. Кочерина и для которых не имеется подходящих аналогов, приходится пользоваться другими формулами. Наиболее известной из них является формула Ишковского:

$$Q_{\max} = amFA,$$

где

a и m — коэффициенты, значения которых приведены в табл. 6 и 7;

F — площадь бассейна в кв. километрах;

A — годовое количество осадков в миллиметрах.

Таблица 6

Значения коэффициента m при разных F .

F	1	20	50	150	500	900	1 800	10 000	100 000	250 000
m	0,01	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001

В заключение приведем еще несколько формул иностранных гидрологов и инженеров:

Г а н г и л ь е — для условий Швейцарии:

$$Q_{\max} = \frac{24F^2}{5 + \sqrt{F}}; \quad (11)$$

для условий Северной Италии:

$$Q_{\max} = \frac{32F^2}{0,5 + \sqrt{F}}; \quad (12)$$

К р а с н и к — для условий Австрии:

$$Q_{\max} = \frac{30F^2}{0,5 + \sqrt{F}}; \quad (13)$$

Л а у т е р б у р г — для условий Швейцарии:

$$Q_{\max} = 0,96F^2 \left(\frac{7}{6 + 0,01F} + 0,06f \right) + 0,2F. \quad (14)$$

В этих формулах:

F — площадь бассейна в кв. километрах;

f — площадь ледника в кв. километрах.

Значения коэффициента α .

Топографические условия	Характер почвы и растительности			
	Проницаемая почва, возделанная, покрытая растительностью	Обычные равнинные почвы со средней растительностью	Малопроницаемая почва со слабой растительностью	Непроницаемая почва, скалистая, глинистая, без растительности или промерзлая
Болотистые низины	0,017	0,030	—	—
Низменности и плоская равнина	0,025	0,040	—	—
Частично холмистая низменность	0,030	0,055	—	—
Пологая холмистость	0,035	0,070	0,125	—
Крупная холмистость или частично гористая местность	0,040	0,082	0,155	0,400
Гористая местность, смотря по степени крутизны	0,045—0,080	0,100—0,210	0,190—0,600	0,450—0,800

§ 7. Общий ход проектирования.

Выбрав характерные годы, составляют для каждого из них таблицы для построения гидрографа и хода уровней нижнего и верхнего бьефа, а также календарного хода изменения напоров. Для предварительных расчетов горизонт воды верхнего бьефа можно считать неизменным. Что касается уровней нижнего бьефа, то таковые строятся по кривым расхода естественного режима, если нижний участок реки остается свободным, и на основании абак, построенных по вычисленным кривым подпора от ниже расположенных сооружений.

В зависимости от типа реки и наличия гидрометрических материалов, табличные данные могут составляться на каждый день или через более или менее длительные интервалы времени (например, через δ дней, 10 дней, месяц). При озерном типе рек интервалы могут быть более длительны, для периодов паводков они должны быть короче, чем для периода с устойчивыми уровнями воды. При недостатке гидрометрических данных часто приходится ограничиваться среднемесячными расходами и постоянной величиной напора, что отражается, конечно, на точности результатов подсчета.

При наличии многих водопользователей потребности на воду должны учитываться, как указано выше (табл. 1). Сводная ведомость при этом может иметь примерную форму, показанную в табл. 8.

Таблица 8.

Год	Месяц, число	Бытовой расход в реке $\text{м}^3/\text{сек}$	Расход, потребный для водопользо- вателей, кроме энергетики, $\text{м}^3/\text{сек}$			Расход, сво- бодный для энергетиче- ского ис- пользования $\text{м}^3/\text{сек}$	Расход в нижнем бьефе $\text{м}^3/\text{сек}$	Отметка горизонта воды		Напор ж	Мощ- ность кВт
			не возвра- щенный в нижний бьеф	возвращен- ный в ниж- ний бьеф	суммар- ный			верхнего бьефа ж	нижнего бьефа ж		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Из гид- рологи- ческих данных	По данным подсчетов (табл. 1)			(3) — (6) ¹	(3) — (5)	По данным гидравличе- ского рас- чета плоти- ны	По кривой расхода	(9) — (10)	8 × (7) × × (11)

Цифры, стоящие в скобках, обозначают порядковый номер графы.

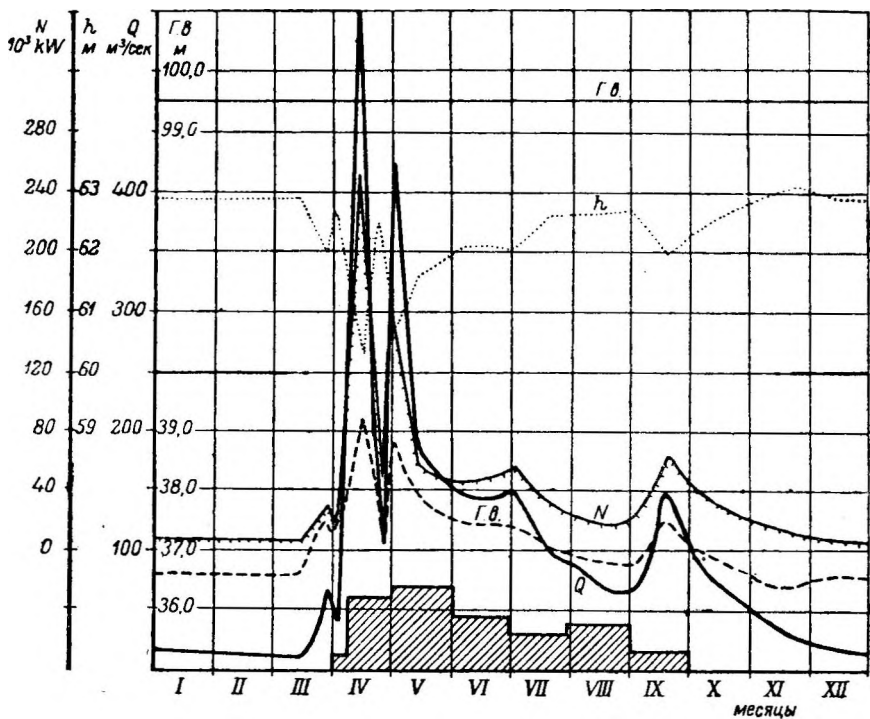


Рис. 3. Календарный график изменения расходов (Q), уровней (горизонтов воды—г. в.) верхнего бьефа (в. б.) и нижнего бьефа (н. б.), напоров (h) и мощностей водотока (N).

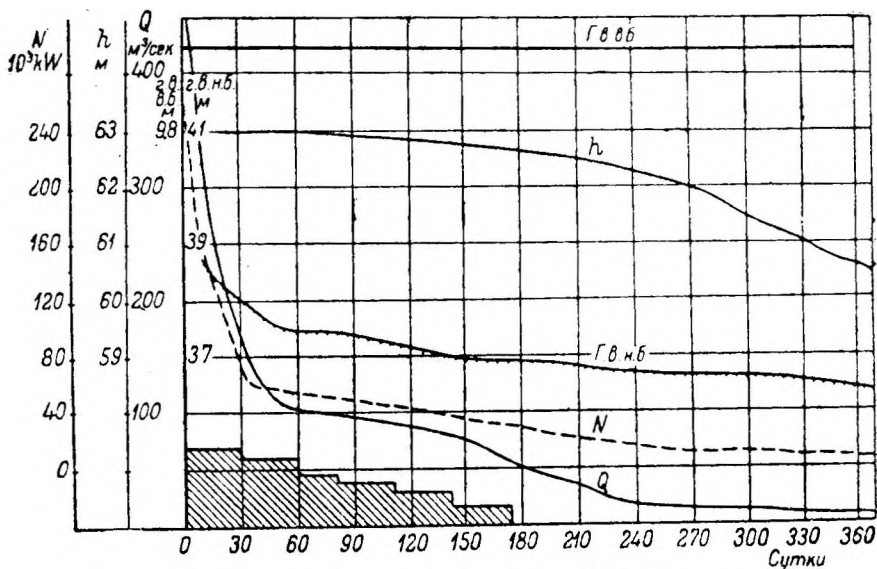


Рис. 4. График длительности горизонтов воды, расходов, напоров и мощностей.

Данные табл. 8 следует представить графически в виде календарных графиков расходов, напоров и мощности (рис. 3).

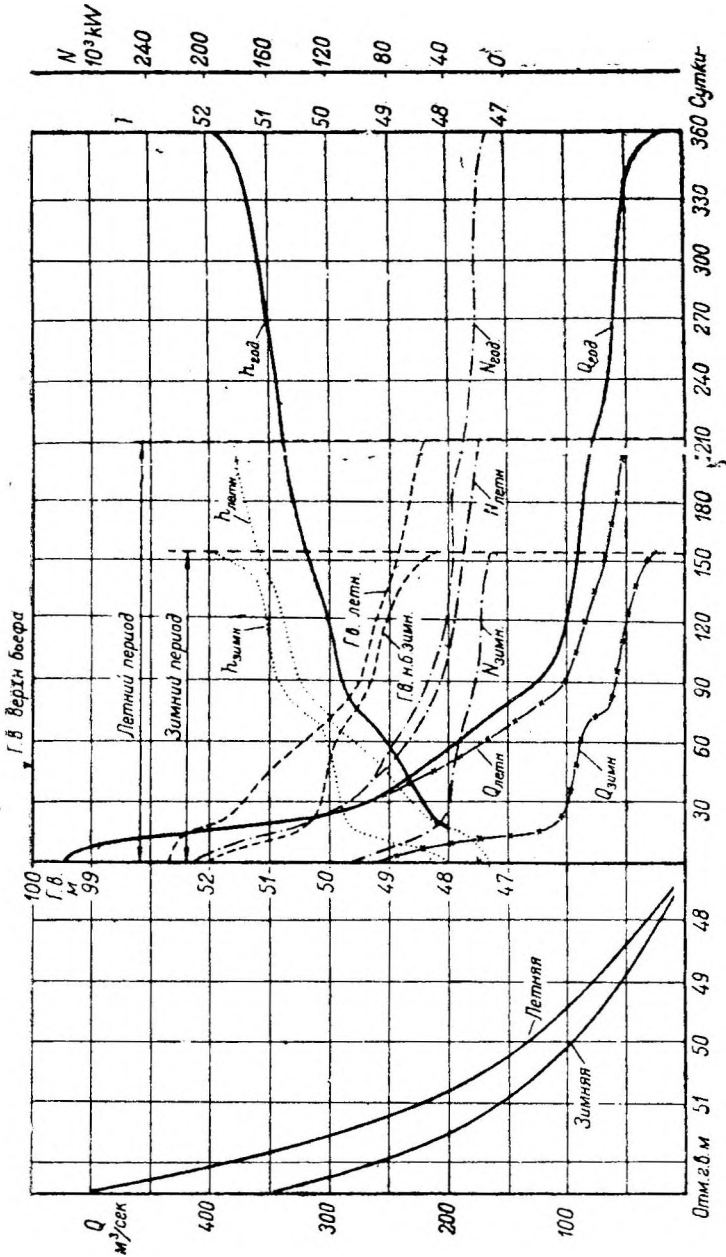


Рис. 5. График длительности расходов, напоров и мощностей по суткам.

Дальнейшие вычисления и построения имеют целью получение таблиц и графиков длительности расходов, напоров и мощностей как для всего года, так и для отдельных сезонов (рис. 4).

Если водопользователем является только энергетика, то табличные формы и графики значительно упрощаются, и построение графика длительности напоров и мощностей можно выполнить, пользуясь графиком длительности расходов и кривыми расхода — зимней и летней (рис. 5). Построение при этом выполняется следующим образом: на рисунке наносят график длительности расходов за год и для каждого периода (летний, зимний).

Пользуясь летней кривой расходов, наносят кривую длительности летних уровней воды (нижний бьеф), аналогично поступают и для зимнего периода. По данным гидравлического расчета плотины, сообразно расходам на рисунке, наносится кривая длительности горизонта воды верхнего бьефа. По разностям кривых для верхнего и нижнего бьефа наносится по периодам кривая изменения напоров. Пользуясь ею, вычисляют мощность по формуле $N = 8QH$ и наносят для каждого периода кривую длительности мощности. Суммируя абсциссы кривых длительности по периодам, получают годовую кривую длительности.

Полученные в результате указанных выше подсчетов таблицы и графики являются исходными для энергетических подсчетов: выбора мощности типа турбин и подсчета выработки энергии.

III. МНОГОЛЕТНЕЕ, ГОДИЧНОЕ И СЕЗОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА.

§ 8. Основные положения и общие данные о методике расчета.

Подсчет годового стока водотока может быть осуществлен либо во гидрографу, либо по кривой длительности расходов. Аналитическое определение производится по следующему равенству:

$$S = \int_0^t q dt, \quad (15)$$

где S —сток за период в куб. метрах;

t — длительность периода в секундах;

q — расход в $m^3/сек.$

Так как $q = F(t)$ не может быть выражено математической формулой, то обычно интегрирование заменяется непосредственным суммированием, и выражение (15) принимает вид:

$$S = \sum_0^t q \Delta t. \quad (16)$$

Средний расход за период согласно уравнению (16) будет:

$$q_{cp} = \frac{1}{t} \sum_0^t q \Delta t. \quad (17)$$

Для годового периода q_{cp} равно средне-годовому расходу, для которого нами введено обозначение Q .

Если обозначить через R расход воды, необходимый для полного покрытия нужд водопользователей, то, очевидно, регулирование стока потребуется только в том случае, если $R > q_{min}$. Недостаток воды W_2 , который должен быть заимствован из водохранилища, определится из выражения:

$$W_2 = \int_0^{t_2} (R - q) dt \quad (18)$$

или, при замене интегрирования суммированием,

$$W_2 = \sum_0^{t_2} (R - q) \Delta t, \quad (18 а)$$

где t_2 — длительность в секундах периода, в течение которого (рис. 6).

$$R > q$$

В течение периода времени t_1 когда $R < q$, избыточная вода используемого потока ($q - R$) может быть накапливаема в водохранилище, причем объем ее определяется по выражениям, аналогичным выражению (18):

$$W_1 = \int_0^{t_1} (q - R) dt;$$

$$W_1 = \sum_0^{t_1} (q - R) \Delta t. \quad (19)$$

Для водопользования решающим является объем W_2 характер же регулирования зависит от соотношений W_1 и W_2 . Если для годового

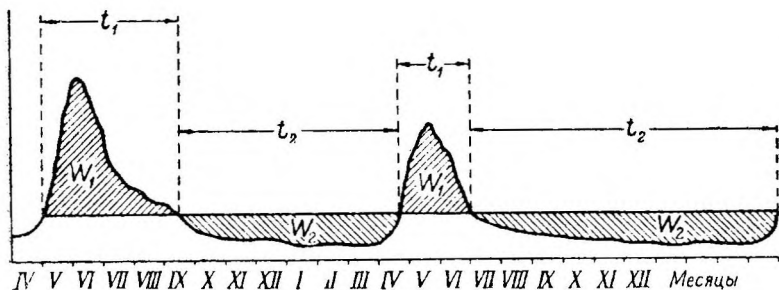


Рис. 6. Календарный график естественных и зарегулированных расходов.

периода $W_1 < W_2$, то водоносность рассматриваемого года недостаточна для удовлетворения всех нужд водопользователей, и возникает необходимость дополнительного резервирования воды за счет избытков более многоводных лет, и регулирование, таким образом, будет многолетним (двух-трехгодичное и т. д.). При $W_1 = W_2$ баланс воды для года сходится полностью, и регулирование, следовательно, годовое. Наконец, при $W_1 > W_2$ избыток воды полноводного периода года превосходит недостаток в воде маловодного, и регулирование нужно сезонное. Так как естественный расход в реке q является переменным и в годовом и в вековом разрезе, то одним и тем же объемом водохранилища в разные годы будут зарегулированы равные расходы. Процент обеспеченности того или иного расхода может быть подсчитан по формуле:

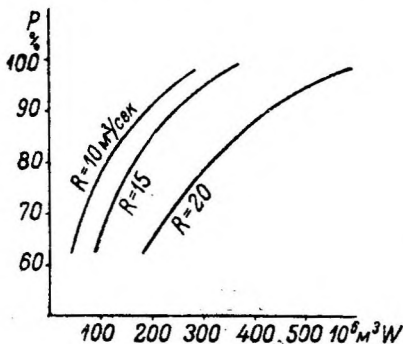


Рис. 7. Кривые обеспеченности регулируемых расходов при разных емкостях водохранилищ.

зарегулированы равные расходы. Процент обеспеченности того или иного расхода может быть подсчитан по формуле:

$$p = 100 \frac{m - 0,5}{n}, \quad (20)$$

где

p — процент обеспеченности;

m — число лет, в течение которых расход будет не меньше заданной величины;

n — число лет анализируемого периода.

Если задаться различными емкостями водохранилища, то соответственно этим емкостям можно определить величины регулируемых расходов и процент их обеспеченности.

Например, расчетом определены зависимости между емкостью водохранилища W_1 , величиной регулируемого расхода и процентом его обеспеченности p . Результаты расчета приведены в табл. 9 и показаны на рис. 7.

Таблица 9

Емкость водохранилища W . . . 10^6 м^3	500	400	300	200			100		50	
Регулируемый расход $\text{м}^3/\text{сек}$	20	20	20	15	20	15	10	15	10	10
Из 30 анализируемых лет расход обеспечен в течение лет . .	29	27	24	29	20	26	29	20	24	20
Процент обеспеченности	95,0	88,3	78,3	95,0	65	83,3	95,0	65	78,3	65

На основании этой таблицы и графика (рис 7) легко подсчитать емкости водохранилищ для любой обеспеченности различных расходов. Результаты подсчета для предыдущего примера показаны на табл. 10.

Таблица 10

Регулируемые расходы $\text{м}^3/\text{сек}$.	Необходимая емкость W в млн. м^3 при обеспеченности расходов p							
	65%	70%	75%	80%	90%	95%	97%	99%
20	200	235	270	310	420	500	530	590
15	100	115	135	160	245	300	340	380
10	50	65	85	110	180	235	265	350

Для промышленного водоснабжения процент обеспеченности не должен быть меньше 97%, чем и определяется нижний предел емкости водохранилища. При гидроэнергетическом водопользовании на основании экономических расчетов устанавливается величина предельного используемого расхода Q_p , который почти что всегда меньше наибольшего расхода водотока. Очевидно, что при отсутствии регулиро-

вания часть стока для расхода $q > Q_0$, бесполезно сбрасывается, при регулировании же эта часть используется полностью или частично) в зависимости от емкости водохранилища W . Так как при регулировании расходы воды в зимний период повышаются, то, помимо увеличения выработки энергии, уменьшается мощность теплового резерва и время его работы.

Таким образом увеличение емкости водохранилища должно иметь следствием увеличение продукции водопользователей. Однако вместе с увеличением емкости водохранилища растут и бесполезные потери

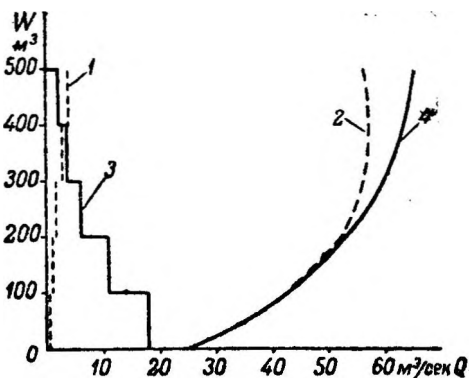


Рис. 8. Зависимости регулируемых расходов от объемов водохранилищ.

1 — нарастание потерь; 2 — расходы с учетом потерь; 3 — нарастание расходов; 4 — расходы без учета потерь.

воды из него, и для некоторых неблагоприятных местных условий (топографических, гидро-геологических и климатических) с некоторого объема W_0 увеличение потерь будет превышать увеличение полезного расхода (рис. 8). Очевидно, что указанный объем W_0 будет предельным, так как при дальнейшем увеличении емкости регулируемый расход будет уменьшаться.

Если, с одной стороны, с увеличением емкости водохранилища увеличивается продукция водопользователя и тем самым увеличивается его валовая доходность, то, с другой стороны, увеличиваются и капиталовложения, а следовательно и ежегодные расходы. Из сказанного вытекает

экономический критерий выбора емкости водохранилища, а именно: стоимость продукции при регулировании не должна превысить таковой при использовании водотока в условиях естественного режима. Для получения наиболее выгодного решения необходимо провести водохозяйственное проектирование 3—4 различных объемов водохранилища, определить для каждого варианта по схематическому проекту использования стоимость продукции и по интерполяции выбрать наиболее экономичное решение. При целевом водопользовании задача решается довольно просто, при комплексном — решение усложняется, так как необходимо учесть интересы каждого водопользователя.

Во всех случаях выбранная емкость должна быть такова, чтобы наполнение ее было обеспечено.

§ 9. Влияние расположения водохранилища на методику расчетов.

Водохранилище может быть образовано в котловине озера или в долине самого водотока либо непосредственно плотиной головного узла, либо самостоятельной плотиной.

В первом случае колебания горизонта воды водохранилища будут влиять на величину напора, во втором — напор не будет зависеть от

работы водохранилища. При водохранилище, удаленном от водоприемных сооружений, используемый водоток может иметь значительное питание с незарегулированной части бассейна.

При наличии такой приточности можно либо назначить расход из водохранилища равномерным, либо запроектировать попуски из водохранилища так, чтобы достигнуть в створе заборных сооружений наиболее желательного режима расходов. Последний метод регулирования называется компенсированным. Наконец, если по местным условиям или по общей схеме использования водотока водохранилища располагают в нескольких пунктах, то регулирование стока происходит последовательно от верхних водохранилищ к нижним. При распределении общей потребной емкости между отдельными водохранилищами необходимо особенное внимание обращать на то, чтобы наполнение водохранилища избыточным притоком было безусловно обеспечено.

При образовании водохранилища в котловине озера необходимая емкость может быть получена либо подъемом естественного горизонта воды, либо — при достаточной глубине озера — путем понижения естественного горизонта воды.

В первом случае имеет место так называемое регулирование вверх, во втором — регулирование вниз. Возможна, конечно, и смешанная схема регулирования. При регулировании вверх выбор емкости водохранилища будет зависеть от геологических и гидро-геологических условий котловины или долины, стоимости отчуждений и водоподъемных сооружений. Возможность регулирования вниз определяется стоимостью работ по устройству водозаборных сооружений. Наинизший горизонт воды, определяющий мертвый объем водохранилища, должен быть выбран так, чтобы при всех условиях забор регулируемого расхода был обеспечен.

Если водохранилищем служит озерная котловина, то постепенная сработка его идет горизонтальными слоями. Такая сработка упрощает как подсчеты емкости водохранилища, так и определение режима его уровней

Таблица 11

Отметка горизонта	Разность отметок h m	Площадь в пределах горизон- тали F m^2	Средняя площадь между смежными горизон- талями $\frac{1}{2}(F_n + F_{n+1})$ m^2	Объем меж- ду двумя смежными горизон- талями W m^3	Суммарный объем W m^3	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
	Из гра- фы (1)	По пла- ниметри- рованию	Из графы (3)	(2) × (4)	Суммиро- вание данных графы (5)	,

Расчет емкости водохранилища ведется на основании планов в горизонталях. Путем планиметрирования определяется площадь, заключенная в пределах горизонтали, и затем подсчеты ведутся сообразно табл. 11.

Данные табл. 11 изображаются графически (рис. 2).

При образовании водохранилища в долине водотока задача значительно усложняется. Дело в том, что в период работы водохранилища имеет место неустановившееся движение воды, так как используемый расход превышает приток и нарастание расхода по пути водотока зависит от сработки водохранилища. Таким образом, свободная поверхность воды водохранилища должна удовлетворять условиям неустановившегося движения и баланса воды. Сработанный объем водохранилища определяется из равенства:

$$W = \int_0^t (R - q) dt, \quad (18)$$

где t — время сработки водохранилища;

R — регулированный расход;

q — расход притока в водохранилища.

Этот объем W должен быть в точности равен объему, заключенному между первоначальным уровнем водохранилища и уровнем свободной поверхности воды в конце периода t . Этот последний уровень определяет пониженную отметку горизонта воды у заборных сооружений и рассчитывается из условия, чтобы у заборных сооружений проходил расход R , а в конце кривой подпора — расход q . Методика расчета дана инж. Н. М. Бернадским и изложена в его труде "Речная гидравлика".

Ниже будет показано, что при речном водохранилище потребная емкость для обеспечения расхода R может быть определена без особых затруднений. Имея расходы R и q , отвечающие наибольшей емкости, можно вычислить объемы водохранилища в зависимости от отметок воды у плотины.

Вычисления производятся следующим образом: задаются различными отметками горизонта воды на плотине и по расходам R и q вычисляют свободную поверхность по длине водотока; наносят полученные данные на план и планиметрируют площади, заключенные в пределах нанесенных горизонтов воды. Дальнейший ход расчета такой же, как указано выше в табл. 11. Результаты расчета изображаются графически. Для других комбинаций R_i и q_i построенный график $W = f(H)$ дает только приближенные решения. Поэтому для предварительных решений часто можно ограничиться построением зависимости $W = f(H)$ в предположении, что уровень воды в водохранилище горизонтален. Зависимость $W = F(H)$, построенная в таком предположении, будет тем точнее, чем больше величина подпора.

При устройстве водохранилища в озерной котловине необходимо учесть регулирующее влияние самого озера. Для устранения этого влияния расчеты ведутся по притоку воды в озеро. Так как обычно

гидрометрические наблюдения дают величины расхода из озера, то приток в озеро определяется из уравнения:

$$q_{np} = q_{cm} \pm \frac{\Delta h}{\Delta t} F, \quad (21)$$

где q_{cm} — расход из озера;

F — площадь зеркала озера;

Δh — изменение горизонта воды за период времени Δt .

При энергетическом использовании потока водохозяйственное проектирование должно дать данные не только о ходе регулированных расходов, но также, соответственно, и о ходе напоров и мощностях. Эти требования при образовании озерного водохранилища плотиной, расположенной в значительном удалении (например, подпор Онежского озера Подпорожской плотиной в 90 км от истока, Ладожского озера — Невской плотиной и др.), вызывают необходимость установить на основании расчета значительного числа кривых подпора связь между ходом уровней в водохранилище и у плотины.

Основным методом решения водохозяйственных задач является метод интегральных кривых, позволяющий полностью осветить работу водохранилища в отношении как режима расходов, так и уровней. Метод расчета по гидрографам вследствие своей громоздкости и малой наглядности в настоящее время оставлен вовсе;

§ 10. Метод интегральных кривых.

Выше было указано, что суммарный сток за какой-либо период времени $t = t_3 - t_1$ может быть определен по равенству:

$$S = \int_{t_1}^{t_3} q dt. \quad (15)$$

Если равенство (15) представить графически, то полученная кривая $S = f(t)$ позволит определить сток от какого-либо начального момента времени до любого момента t_2 . Такая кривая называется интегральной или суммарной кривой стока.

Для построения обычно пользуются равенством (16):

$$S = \sum_{t_1}^{t_2} q \Delta t. \quad (16)$$

Интервал времени Δt выбирают в 5—10—15 дней, причем более длительный период применяется для рек озерного типа.

Вычисления ведутся согласно форме, показанной в табл. 12.

Если водохранилище будет образовано в озерной котловине, то сообразно изложенному выше необходимо регулирующее влияние озера исключить и все расчеты вести по притоку. Иными словами, необходимо построить интегральную кривую притока. Для этой цели необходимо будет воспользоваться равенством (21), и форма расчетной ведомости несколько усложнится (табл. 13).

Таблица 12

Год	Месяц, число	Длительность периода в днях Δt	Расход на данное число q м ³ /сек	Средний расход за период $q_{ср}$ м ³ /сек	Сток за период $\Delta S = 0,0864 \times q_{ср} \Delta t$ млн. м ³	Суммарный сток $\Sigma \Delta S$ млн. м ³	Примечание
1895	Май						
	1	5	57	73	31,5	0	
	6	5	89	105	45,5	31,5	
	11		121			77,0	

Результаты подсчета суммарного стока или притока изображаются графически интегральными кривыми (рис. 9). Построение их следующее (рис. 9а). Но оси абсцисс прямоугольной координатной системы откладывают время в календарной последовательности, по оси ординат — объемы. Из расчетной ведомости на чертеже наносят точками объемы, соответствующие расчетным дням. Соединив точки плавной кривой, получают интегральную кривую в прямоугольных координатах. Масштабы для времени при построении по суткам выбираются: 1 мм — 1 день или 2 дня; если построение вести по декадам или месяцам, можно принимать 1 мес. — 3 мм, 6 мм, 10 мм и т. д. Масштабы для объемов применяются также различные, в зависимости от водотока и желательной точности расчета: 1 см—10, 50, 100 и более миллионов куб. метров. Так, на рис. 9а для масштаба времени принят 4 мм—1 мес. и для масштаба объемов 1 см—50 млн. м³

Таблица 13

Год	Месяц, число	Длительность периода Δt	Расход воды на данное число q	Средний расход за период $q_{ср}$	Сток за период $\Delta S = 0,0864 \Delta t$	Отметка горизонта воды озера на данное число h	Изменение отметки горизонта воды за период Δh	Площадь зеркала озера, соответствующая отметке h	Средняя площадь зеркала за период F	Сработанный или накопленный запас воды ΔW	Приток за период $\Delta S_{пр} = \Delta S + \Delta W$	Суммарный приток $\Sigma \Delta S_{пр}$
1895	Май											
	1	5	34	33	14,3	15,74	-0,02	100	99,5	-1,99	12,31	0
	6	5	32	36	15,6	15,72	0,08	99	101	8,08	23,68	12,31
	11		40			15,80		103				35,99

Укажем некоторые свойства интегральных кривых. Непосредственно из уравнения (15) следует, что:

$$\frac{dS}{dt} = q = \operatorname{tg} \alpha, \quad (22)$$

т. е., что касательная, проведенная к любой точке кривой, определяет расход того момента времени, который соответствует абсциссе точки

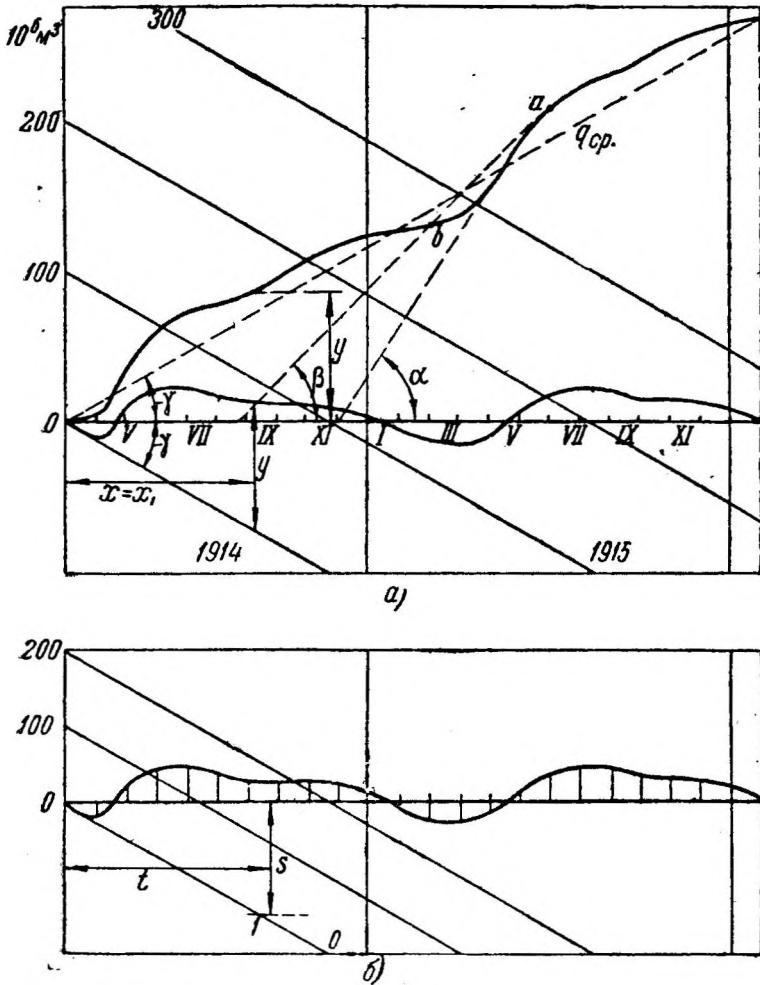


Рис. 9. Интегральные кривые стока в прямоугольных и косоугольных координатных осях.

касания, и что величина расхода равна тангенсу угла, образованного касательной с осью абсцисс (рис. 9а). Таким образом направление оси абсцисс соответствует направлению расхода, равного нулю (нулевой расход). Из равенства (17) следует, что всякая прямая, соединяющая две любых точки интегральной кривой, определяемых абсциссами t_1 и

t_2 характеризует средний расход за период $t_2 - t_1$ и величина этого расхода определяется тангенсом угла, образованного этой прямой, с осью абсцисс:

$$q_{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{t_1}^{t_2} q \Delta t = \operatorname{tg} \beta. \quad (23)$$

Таким образом прямая, соединяющая крайние точки интегральной кривой, характеризует средний расход за весь период, для которого интегральная кривая построена.

Если интегральную кривую построить в прямоугольных координатах за длительный ряд лет, то чертеж становится громоздким и неудобным для проектирования.

Для придания чертежу более компактной формы интегральную кривую строят обычно в косоугольных координатах. При построении ось ординат сохраняют вертикальной, а ось времени (ось абсцисс) — горизонтальной, направление же нулевого расхода наклоняют так, чтобы угол, образованный им с горизонтальной линией, примерно был равен углу наклона линии среднего расхода в прямоугольной системе координат (рис. 9а), т. е.

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{T} \sum_0^T q \Delta t,$$

где

γ — угол наклона направления нулевого расхода к горизонтальной прямой;

T — период времени, за который построена интегральная кривая.

Величины абсцисс и ординат сохраняют те же значения, что и в прямоугольных координатах, т. е. $x_1 = x$ и $y_1 = y$.

Построение координатной сетки начинают с выбора масштаба объемов (ось ординат) и времени (ось абсцисс). Например, принимают следующие масштабы: 1 см — 5000 млн. м³ и 1 см — 1 мес. Затем для рассматриваемого периода в n лет выясняют, чему будут равны в принятом масштабе наибольшие абсцисса и ордината. При $n=10$ лет наибольшая абсцисса будет

$$x_{\max} = 12 \times 10 = 120 \text{ см.}$$

Если суммарный сток за весь период равен $S = 15 \times 10^{11} \text{ м}^3$, то наибольшая ордината

$$y_{\max} = \frac{15 \times 10^{11}}{5 \times 10^9} = 300 \text{ см.}$$

Наклон среднего расхода определится $\operatorname{tg} \gamma = \frac{300}{120} = 2,5$.¹ Такой же наклон следует придать и направлению нулевого расхода (рис. 9а). Через точки деления оси ординат проводят линии, параллельные направлению нулевого расхода, и у концов этих линий выписывают соответствующие им объемы. Затем через начало координат проводят горизонтальную линию и откладывают по ней масштаб времени такой

¹ Численную величину $\operatorname{tg} \gamma$ следует округлять до десятых долей для удобства построений. Например, $\operatorname{tg} \gamma = 2,67$ следует принять 2,7.

же, какой был бы принят для прямоугольных координат. Исполненный таким образом рисунок (на клетчатке) и представляет собой сетку, на которой можно наносить интегральную кривую (рис. 11—13, см. дальше). При нанесении ординат нет надобности их откладывать от нулевой линии. Для этого пользуются линиями, параллельными оси нулевого расхода, с подписью объема, ближайшего к наносимому.

Интегральную кривую можно построить иначе, пользуясь разностью стоков действительного и фиктивного, в предположении, что в течение всего времени притекает расход, равный среднему за весь период. Для этой цели подсчитывают сток за все годы расчетного периода и определяют средний многолетний расход. По величине среднего многолетнего расхода подсчитывается суммарный сток (фиктивный) для всех выбранных в расчете моментов времени (табл. 14) и затем составляются разности между действительным и фиктивным стоками. На рисунке положительные разности откладываются в принятом масштабе вверх, а отрицательные — вниз (рис. 96). Ось нулевого стока (расхода) может быть легко определена следующим образом: вычисляется за некоторый период времени (например месяц, год) сток S и откладывается от горизонтальной оси вниз. Прямая, соединяющая начало координат с полученной точкой (рис. 96), и будет направлением нулевого стока. Построение масштабной сетки производится согласно изложенному выше.

Таблица 14

Год	Месяц, число	Период в днях	Средн. расход за период $\text{м}^3/\text{сек}$	Сток за период 10^6 м^3	Сумм. сток за период 10^6 м^3	Средний многолетний расход $\text{м}^3/\text{сек}$	Фиктивный сток 10^6 м^3		Разность сумм. сток действительный и фиктивный
							За период	Суммарный	
1936	Март				0,0			0,0	0,0
	1	10	3,0	25,9	25,9	35,0	30,2	30,2	-4,3
	11	10	2,8	24,2		35,0	30,2		
	21				50,1			60,4	-10,3
	Февр.								
	1	10	4,2	36,3	86,1	35,0	30,2	30,2	-4,2
11	10	7,5	54,8	35,0		30,2	30,2	120,8	+20,4
					141,2			120,8	

Для возможности графического определения расходов по интегральной кривой строится так называемый лучевой масштаб расходов.

Построение его основано на том, что при постоянстве расходов интегральная кривая превращается в прямую линию. При построении задаются периодом времени, обычно одним годом, и за этот период вычисляют сток для разных величин расходов (табл. 15).

Таблица 15

Величина расхода м ³ /сек	Длительность периода млн. сек	Суммарный сток за период млн. м ³
0	31,5	0
10	31,5	315
20	31,5	630
30	31,5	945
40	31,5	1260
50	31,5	1575
60	31,5	1890
70	31,5	2205
80	31,5	2520
90	31,5	2835

Откладывая вычисленные величины стока от линии нулевого расхода в конце периода и соединяя нанесенные точки с началом координат, получим пучок прямых, рядом с которыми выписываются соответствующие им расходы. Полученный рисунок и представляет собой лучевой масштаб расходов.

Если в результате регулирования расход будет иметь величину $R = f(t)$, то, очевидно, совершенно аналогично изложенному может быть построена интегральная кривая регулированных расходов и совмещена с интегральной кривой притока. Так как величины естественных и регулированных расходов неодинаковы, то и суммарный их сток на равные моменты времени неодинаков, и разность стоков определится из выражения:

$$W = S - S_k = \int_0^t (q - R) dt. \quad (24)$$

Если за период времени t_1 , естественный сток больше регулированного, то избыток стока наполнит объем водохранилища W , а при обратном соотношении объем W должен быть заимствован из водохранилища.

Так как величина стока определяется ординатой интегральной кривой, то, следовательно, разность ординат интегральных кривых естественного и регулированного стока определяет тот объем, который должен быть в водохранилище зарегулирован или, наоборот, заимствован.

На рис. 10 нанесена интегральная кривая естественного и регулированного стока $abcdefghp$. На этом же рисунке показаны среднееголетний расход, среднегодовые расходы ok, kl, lm, mn, np , средние расходы за гидрологические периоды ac, ce, ei, gi . При наполнении водохранилища с начала весеннего наводка разность ординат интегральной кривой естественного и зарегулированного стока возрастает и достигает своего максимума в тот момент, когда приточный расход сравнивается с регулированным, и затем для поддержания регулированного расхода начинается сработка водохранилища, что на рисунке выражается уменьшением разности ординат.

Сработка водохранилища кончается к началу паводка в тот момент, когда наступит равенство естественного и регулируемого расходов.

Точки пересечения интегральных кривых естественного и регулируемого стока показывают полное использование стока, и в эти моменты времени отметки горизонта воды водохранилища равны отметке при начале регулирования. Отметки горизонта воды на любой

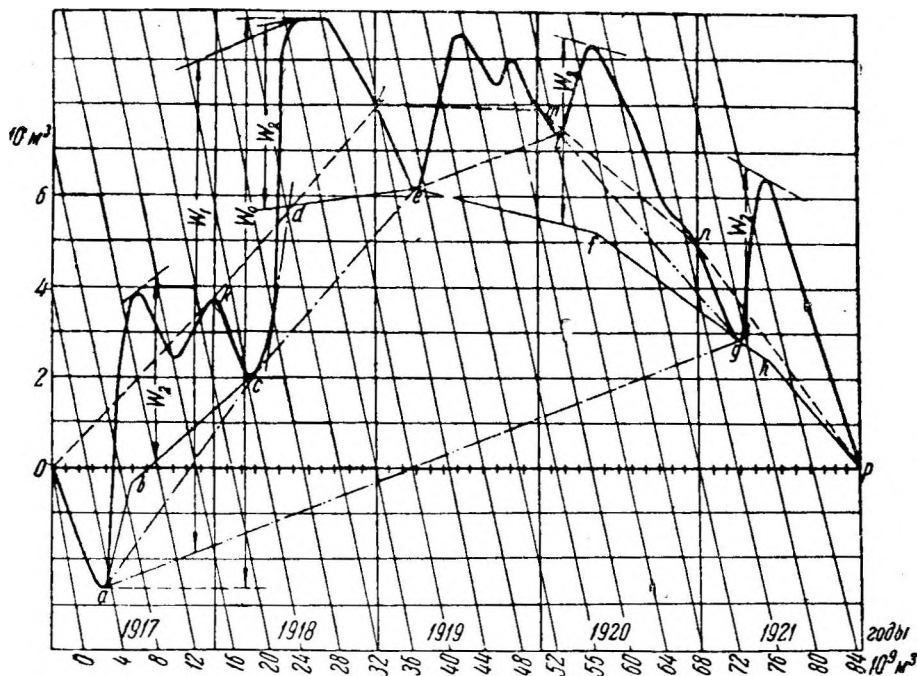


Рис. 10. Интегральная кривая стока в косоугольных координатах.

момент времени могут быть определены по кривой зависимости емкости водохранилища от отметок (рис. 2).

Из равенства (24) вытекает, что при $q = R$ объем сработки водохранилища равен нулю, т. е. отметка водохранилища в течение всего периода времени сохраняется неизменной. Таким образом при начале регулирования от наполненного водохранилища интегральная кривая естественного стока должна располагаться ниже интегральной кривой регулируемого стока (рис. 11); при начале же регулирования от опорожненного водохранилища положение будет как раз обратное (рис. 10).

При определении необходимой емкости водохранилища для обеспечения регулируемого расхода R расчет ведется в предположении наполненного водохранилища, что обычно имеет место после прохода весеннего паводка. Для получения графического решения к интегральной кривой в момент окончания паводка проводится касательная (рис. 11) параллельно линии, отвечающей величине регулируемого

расхода по лучевому масштабу расходов. Разность ординат между проведенной линией и интегральной кривой определяет сработанный объем водохранилища, а наибольшая из них дает величину искомого объема. Так как согласно предположению регулирование начиналось с наполненного водохранилища, то пересечение линии регулируемого расхода с интегральной кривой естественного стока показывает, что к моменту пересечения обеих линий водохранилище вновь наполнено. Так, согласно рис. 11, для обеспечения расходов в 18 и 20 м³/сек требуется трехгодичное регулирование, причем $W_{20} = 510$ млн. м³ и

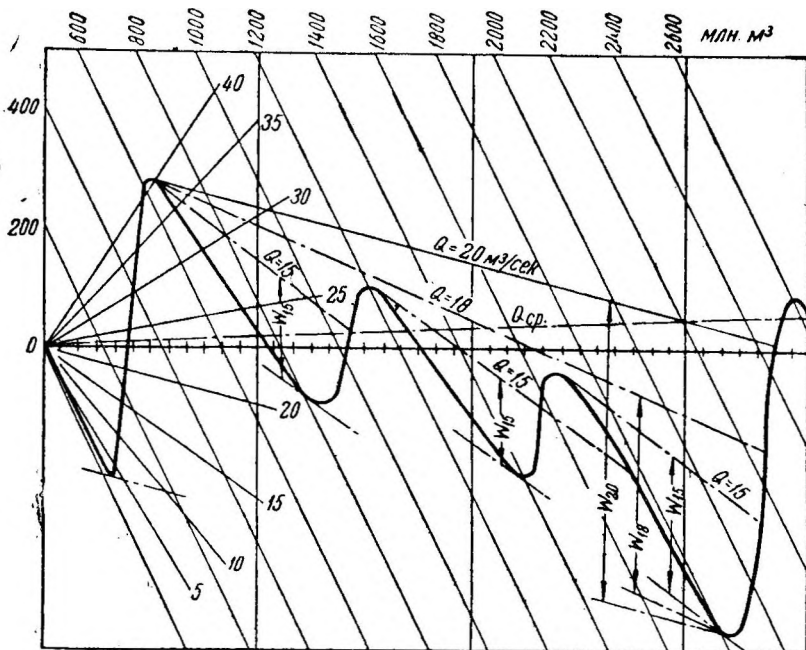


Рис. 11. Определение объема водохранилища для разных обеспеченных расходов.

$W_{18} = 345$ млн. м³; для обеспечения расхода 15 м³/сек регулирование неполное годовое (сезонное), и необходимые для этого емкости $W'_{15} = 165$ млн. м³, $W''_{15} = 145$ млн. м³ и $W'''_{15} = 230$ млн. м³.

Совершенно очевидно, что из приведенных трех объемов необходимо выбрать емкость в 230 млн. м³.

Из указанного видно, что расчетная емкость определяется для годичного регулирования самым маловодным годом, а для многолетнего — соответственно наиболее бедным водой периодом лет. Сказанное хорошо иллюстрируется рис. 12. При многолетнем регулировании необходимый объем водохранилища получается иногда настолько большим, что наполнение его может потребовать нескольких лет. Установление периода наполнения водохранилища является обязательным, так как наполнение должно быть обеспечено к началу пуска ГЭС.

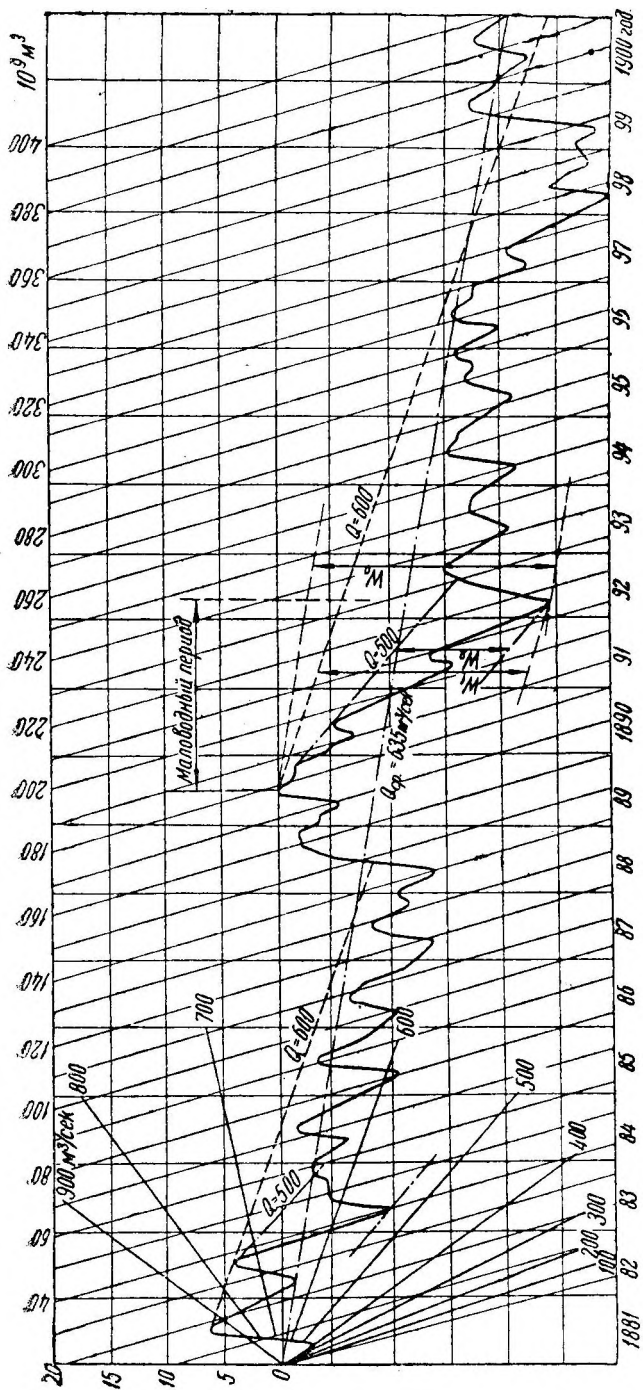


Рис. 12. Интегральная кривая стока и определение объема водохранилища.
 W_6 - объем для регулируемого расхода 635 м³/сек; W_1 — то же для 600 м³/сек и W_2 - то же для 500 м³/сек.

Имея интегральную кривую естественного стока (или притока), выясняют, какой емкостью может быть обеспечен тот или иной регулированный расход. Затем на основании полученных данных строится кривая зависимости емкости W от регулированных расходов R . Так, для при-

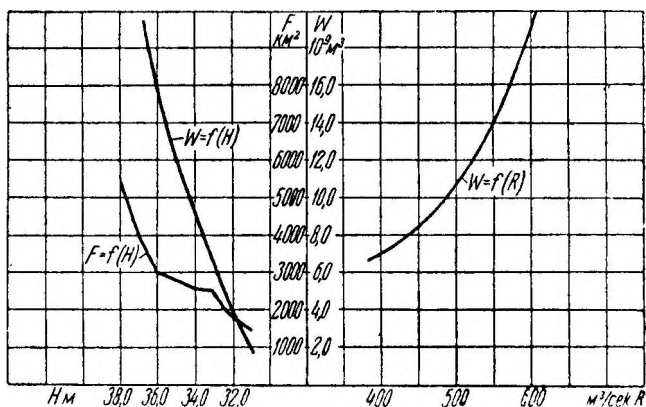


Рис. 13. Кривые зависимости объемов водохранилищ от отметок и отрегулированных расходов.

мера, доказанного на рис. 12, зависимость между W и R получается следующая (табл. 16).

Таблица 16

Величина регулируемого расхода м³/сек	Нормирующий период годы	Потребная емкость млн. м³
635	1889—1892	21 800
600	1889—1892	18 200
500	1890—1892	10 500
400	1883	7 000

Графически зависимость $W = f(R)$ показана на рис. 13, на котором представлена также кривая $W = f(H)$. Если природные условия позволяют осуществить необходимую емкость, то для выбора экономически наиболее выгодной емкости водохранилища следует провести водохозяйственные расчеты для ряда величин W , начиная с W_{\max} , допустимого по местным природным условиям (учитывая в некоторых случаях возможность обвалования). Графическое построение заключается в том, чтобы на чертеже интегральной кривой притока (стока) нанести интегральную кривую регулированных расходов так, чтобы разность ординат обеих кривых не превзошла величины, равной объему водохранилища в принятом масштабе объемов. Для этого в общем случае на чертеже (рис. 10) от точек перегиба интегральной кривой

притока (периоды паводков) откладывают ординаты, по величине равные объему W (на рис. 10 обозначено W_2) и по подученным точкам проводят искомую интегральную кривую регулированных расходов $abcdefghp$, соблюдая указанное выше условие. Величины регулированных расходов R можно определить графически, пользуясь лучевым масштабом расходов, или путем табличных вычислений. Вычисления эти, для упрощения которых всегда необходимо иметь предварительное графическое решение, производятся в табличной форме (табл. 17). Общепринятым является графический метод решения.

Таблица 17

Год	Месяц, число	Длительность периода Δt сутки	Суммарный приток S млн. м ³	Регулированный расход R м ³ /сек	Средний регулированный расход R м ³ /сек	Регулированный сток за период Δt суток млн. м ³	Регулированный сток S_2 млн. м ³	Разность естественного и регулированного стока $S - S_2$ млн. м ³	Объем водохранилища W млн. м ³	Отметка горизонта воды h м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1895	Май 1 6 11	 5 5	Заполняется из ведомости подсчета сумм кри-вой притока.	Вертется с чертежа пред-варительного графиче-ского проектирования	Из данных графы (5)	$0,0864 \times (3) \times (6)$	Последовательное сум-мирование данных графы (7)	(4) — (8)	Начальный объем + (9)	По кривой зависимости $W = f(H)$

Имея календарный ход регулированных расходов и напоров, легко, пользуясь формулой (2), определить изменение мощности, а затем построить график длительности расходов, напоров и мощности.

Из вышеизложенного вытекает, что для выбора окончательной схемы водопользования расчеты приходится производить для ряда емкостей водохранилища.

При наличии длинного ряда лет наблюдений работа приобретает значительный объем, который возможно сократить путем надлежащего выбора более короткого ряда лет наблюдений, результаты расчетов по которому совпадают с таковыми, произведенными по длинному ряду лет. Выбранный для расчетов короткий ряд лет наблюдений называется расчетным периодом.

Основные моменты для выбора расчетного периода следующие:

1. Средний расход выбранного расчетного периода должен незначительно отклоняться от среднееголетнего расхода.

2. В состав расчетного периода должны входить как самые мало-водные, так и самые многоводные годы.

3. Кривая длительности расходов, построенная по расходам расчетного периода, должна незначительно отклоняться от кривой длительности всего периода лет.

Для таких рек, как Волга, Днепр, Свирь, для которых число лет наблюдений превышает 50, удавалось расчетный период ограничивать в —15 годами и таким образом значительно облегчить водохозяйствен-расчеты.

§ 11. Применение метода интегральных кривых при недостатке гидрометрических данных.

Общий процесс проектирования ничем не отличается от изложенного выше, и главное затруднение заключается в построении интегральной кривой естественного стока.

Задача эта решается следующим образом: устанавливают, пользуясь методами, изложенными в § 6, календарное распределение расходов и затем строят интегральную кривую. Если вследствие недостаточности данных удастся выяснить только среднесезонные или годовые расходы, то при определении емкости водохранилища должно учесть дополнительный объем, необходимый для зарегулирования этих средних расходов внутри их периода. Поправка при использовании средне сезонных расходов обычно невелика, при наличии же только среднегодовых расходов может достигнуть довольно большой величины. Так, для примера, изображенного на рис. 10, при проектировании многолетнего регулирования по среднегодовым расходам (линия *oklmnp*) необходимая емкость была бы 8000 милл. м³, в то время как по полным данным необходима емкость в 12800 млн. м³, т. е. на 60% больше. Обычно эта дополнительная емкость составляет 25—40% среднегодового стока.

§ 12. Ход проектирования в зависимости от схемы регулирования.

Выше было указано, что расположение водохранилища по отношению к заборным сооружениям не остается без влияния на методику водохозяйственного проектирования. Рассмотрим отдельные случаи.

а) Водоохранилище образовано самостоятельной плотиной, и колебания горизонта воды в нем не отражаются на напоре. Если между плотиной водохранилища и заборными сооружениями гидроустановки нет бокового притока, то расходы воды в створе плотины и в створе головных сооружений одинаковы. В этом случае проект регулирования исполняется, как указано выше. При наличии бокового притока расходы в створах плотин водохранилища и водозабора различны, и регулирование может быть отнесено либо к первому, либо ко второму створу, соответственно чему и строится интегральная кривая. При регулировании стока в створе плотины водохранилища используемые расходы на гидроустановке получаются путем прибавления к зарегулированным расходам воды расходов q , поступающих в водоток на участке ниже водохранилища. При регулировании в створе заборных сооружений (так называемое компенсированное регулирование) расходы воды из водохранилища определяются как разность между зарегулированным и рас-

ходом q . Форма расчетной ведомости при регулировании в створе плотины показана в табл. 18, а при регулировании в створе заборных сооружений — в табл. 19.

Таблица 18

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Год
													Месяц, число
		Сутки	Δt	q_1	q_2	S	R_n	ΔS_2	S_2	$S - S_2$	W		
		м ³ /сек	м ³ /сек	м ³ /сек	млн. м ³	м ³ /сек	млн. м ³	млн. м ³	млн. м ³	млн. м ³	м	м ³ /сек.	
1895	1	5	Заполняется из гидрометрических материалов	}	Из ведомости подсчета интегральных кривых	Берется с чертежа предварительного графического проектирования	0,0864 × (3) × (7)	Последовательное суммирование данных графы (8)	(6) — (9)	Первоначальный объем + (10)	По кривой $W = f(H)$	(7) + (5) — (4)	Май
	6												

Водохозяйственные расчеты при компенсированном регулировании очень удобно можно производить графическими построениями, которыми режим регулированных расходов определяется как для створа водозаборных сооружений, так и для створа плотины водохранилища. Для этой цели строят две интегральные кривые (рис. 14): одну — для створа водозаборного сооружения (рис. 14, б) и вторую — для створа водохранилищной плотины (рис. 14, а). По выбранному объему водохранилища намечают описанным выше способом интегральную кривую регулируемого стока для створа водозаборных сооружений (рис. 14, б, линия 1-2-3-4 и т. д.), пользуясь которой, легко определить наличный объема воды в водохранилище. Накрывая эти объемы на соответственные даты от интегральной кривой створа плотины водохранилища вниз, получаем ряд точек, соединение которых дает интегральную кривую регулируемого стока из водохранилища (рис. 14, а, линия 1-2-3-4 и т. д.). Следует при этом обязательно проверить, не получаются ли в створе плотины величины регулированных расходов отрицательными, что физически невозможно. Если такой случай будет иметь место, то это будет значить, что приток в водохранилище недостаточен для обеспечения необходимого по регулированию в створе водозаборных сооружений расхода воды.

Год	Месяц, число	Длительность периода Δt		Расход воды в створе плотины водохранилища q_1	Расход воды в створе заборных сооружений q_2	Суммарный приток (сток) S	Регулированный расход в створе заборных сооружений R_3	Регулированный сток за период ΔS_2	Суммарный регулированный сток S_2	Разность естественного и регулируемого стока $S - S_2$	Объем водохранилища W	Отметка горизонта воды водохранилища	Регулированный расход в створе плотины водохранилища $R_n = R_3 - (q_2 - q_1)$
		сутки	$м^3/сек$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
1961	Май	1	Заполняется из гидрометрических материалов	}	Из ведомости подсчета интегральных кривых	Берется с чертежа предварительного графического проектирования	$0,0864 \times (3) \times (7)$	Последовательное суммирование данных графы (8)	(6) — (9)	Начальный объем + (10)	По кривой $W = f(H)$	(7) — (5) — (4)	
	6	5											

В этом случае единственное возможное решение — воду из водохранилища не выпускать. На рис. 14 такой случай имел место в 1921 г. Отложив от интегральной кривой створа плотины водохранилища (рис. 14, а) величину необходимой емкости 0-7, регулированный расход из водохранилища, определяемый лучом 6-7 (рис. 14, а), получается отрицательный. Принимая его равным нулю, определяем по ординате 0-7' наибольший возможный объем воды в водохранилище в этом году. Отложив этот объем от интегральной кривой створа водоразборных сооружений (рис. 14, б), получаем точку 7', через которую и проводим исправленную интегральную кривую регулируемого стока.

б) Водохранилище образовано в озерной котловине путем подпора от плотины гидроэлектростанции (например, регулирование стока Свири, Невы, Сегежи). В этом случае колебание горизонта воды водохранилища отражается на напоре, так как для протекания регулируемого расхода от водохранилища до заборных сооружений требуется соответствующий уклон. Для определения связи между колебаниями горизонта воды на озере и у плотины является необходимым вычисление кривых подпора для разных стояний уровня водохранилища и расходов. На основании этих подсчетов строятся абаксы, которые и представляют искомую связь между уровнями в обеих точках (рис. 15).

При подсчетах кривых подпора должен быть учтен боковой приток. Образец расчетной ведомости показан в табл. 20.

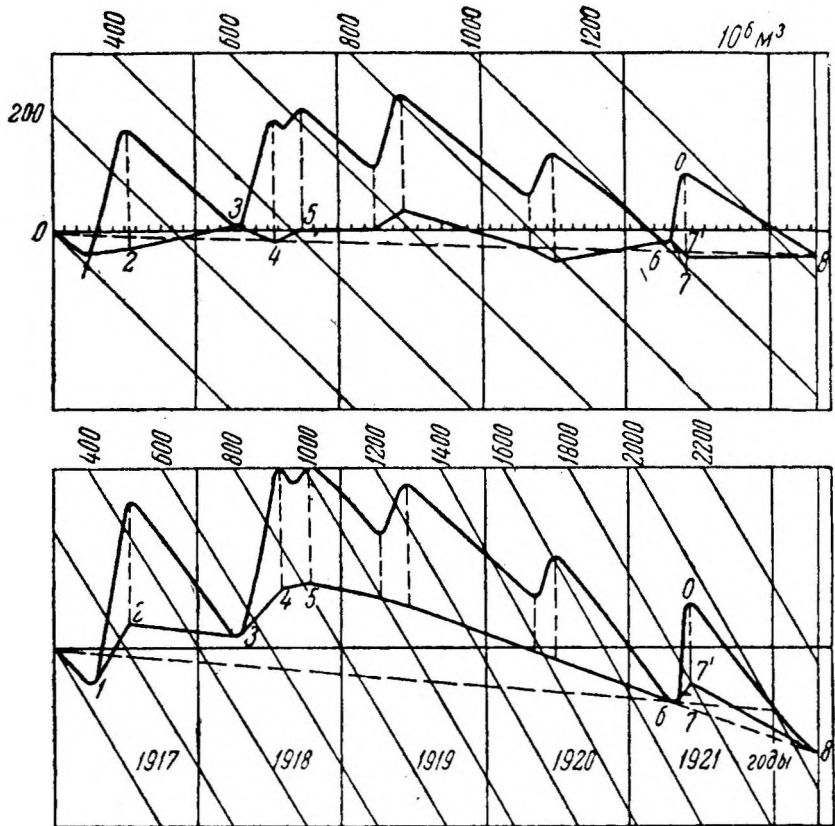


Рис. 14. Определение режима регулированных расходов из водохранилищ при компенсированном регулировании.

Так как при постоянном расходе с изменением напора изменяется и мощность, то может быть поставлен вопрос о регулировании расхода таким образом, чтобы при изменении напора мощность оставалась постоянной, т. е. чтобы $N = 8 qh = \text{const}$. Очевидно, для выполнения этого условия необходимо, чтобы

$$= \frac{N}{8h} \cdot$$

Для примерного определения величины регулируемого расхода можно построить вспомогательный чертеж (рис. 16). Построение делается следующим

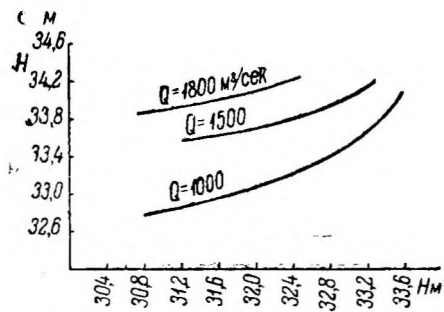


Рис. 15. Кривые связи уровней в водохранилище и у плотин при разных расходах.

Год	Месяц, число	Длительность периода Δt сутки	Суммарный приток S млн. м ³	Регулированный расход R м ³ /сек	Регулированный сток за период $S_2 = \Delta t \cdot R$ млн. м ³	Суммарный егулированный сток S_2 млн. м ³	Разность естественного и регулируемого суммарного стока $S' - S_2$ млн. м ³	Объем водохранилища W млн. м ³	Отметка горизонта воды водохранилища	Отметка горизонта воды у плотины	Отметка горизонта воды нижнего бьефа	Напор	Мощность $N = 8Rh$
	Май												
	1												
	6	с											
	11	с											
			Из ведомости подсчета интегральной кривой	Из данных графического расчета	$0,0964 \times (3) \times (5)$	Последовательное суммирование графы (6)	(4) — (7)	Начальный объем + (4) — (7)	По кривой связи $W = f(H)$	По абакам	По кривой расхода (11) — (12)	$8 \times (5) \times (13)$	

щим образом. На оси ординат, в выбранном масштабе, откладываются величины расходов q и отметки верхнего бьефа $H_{в.б.}$, на оси абсцисс таким же образом — отметки нижнего бьефа $H_{н.б.}$ и объем водохранилища W . Затем накладываются кривые зависимости $q = f(H_{н.б.})$ и $W = f(H_{в.б.})$. Далее выбирают какую-либо мощность N и расход q , вычисляют $(H_{н.б.}) = f(q)$, $h = \frac{N}{8q}$, $H_{в.б.} = H_{н.б.} + h$ и по зависимости $W = f(H_{в.б.})$ определяют соответственный объем W . Расчеты могут быть исполнены по следующей форме (табл. 21).

Таблица 21

N_6 кВт	$q = 300 \text{ м}^3/\text{сек}$				$q = 275 \text{ м}^3/\text{сек}$				$q = 250 \text{ м}^3/\text{сек}$			
	$H_{н.б.}$ м	h м	$H_{в.б.}$ м	W 10^6 м^3	$H_{н.б.}$ м	h м	$H_{в.б.}$ м	W 10^6 м^3	$H_{н.б.}$ м	h м	$H_{в.б.}$ м	W 10^6 м^3
100000	28,7	41,7	70,4	285	28,5	46,5	75,0	410	28,3	50,0	78,3	530
90000	28,7	37,5	66,2	195	28,5	41,0	69,5	275	28,3	45,0	73,3	360

На основании полученных данных строится зависимость $N = f(q \cdot W)$ (рис. 16). Имея по проекту регулирования величину объема водохранилища, на данный момент времени можно определить тот расход, который необходим для поддержания намеченной мощности. Так как режим водотока переменный, емкость же водохранилища ограничена, то каждый год можно обеспечить только вполне определенную мощность, величина которой определяется путем пробных подсчетов.

в) Водохранилище образовано в речной долине плотинной гидроэлектростанции. Общий ход решения задачи такой же, как и для предыдущего случая. Отличие заключается только в опре-

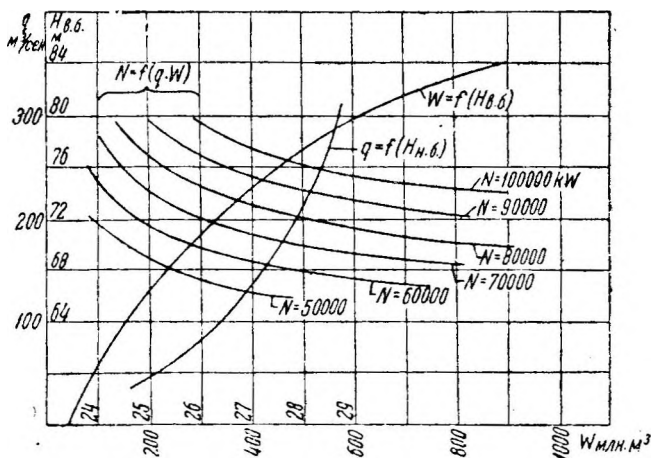


Рис. 16. График зависимости изменения расходов от уровня в водохранилище при постоянной мощности.

делении горизонта воды водохранилища (у плотины) в зависимости от сработанного объема. Выше уже отмечалось, что при работе речного водохранилища имеет место неустановившееся движение воды, сообразно чему и устанавливается продольный профиль воды.

Для предварительных подсчетов считают, что вода в водохранилище срабатывается горизонтальными слоями. При окончательном проектировании для упрощения вычислений кривых подпора исходят из предположения, что нарастание расходов от q до R происходит по линейному закону. Ошибка в определении напора от такого допущения обычно невелика.

При больших сравнительно напорах и относительно незначительных колебаниях горизонтов воды в водохранилище ограничиваются предположением сработки воды горизонтальными слоями.

§ 13. Расчет водохранилища при зависимости регулируемого расхода от наполнения по методу инж. Н. В. Мастицкого.

Выше было указано, что при желании поддерживать постоянную мощность гидроэлектростанции при переменном напоре необходимо в зависимости от напора изменять расход воды. Таким образом для удовлетворения

условия $N = \text{const}$ необходимо, чтобы расход воды $Q=f(W)$, т. е. расход воды зависел от емкости водохранилища. Для определения регулируемого расхода B и расхода уровней водохранилища инж. Н. В. Мастицкий предложил графический метод без применения интегральных кривых.

Основные принципы этого метода заключаются в следующем (рис. 17).

Откладывают в выбранных масштабах по оси абсцисс объемы и по оси ординат отметки. В этих осях строят зависимость $W = f(H_{в.б.})$, причем W — объем водохранилища, считая таковой от отметки

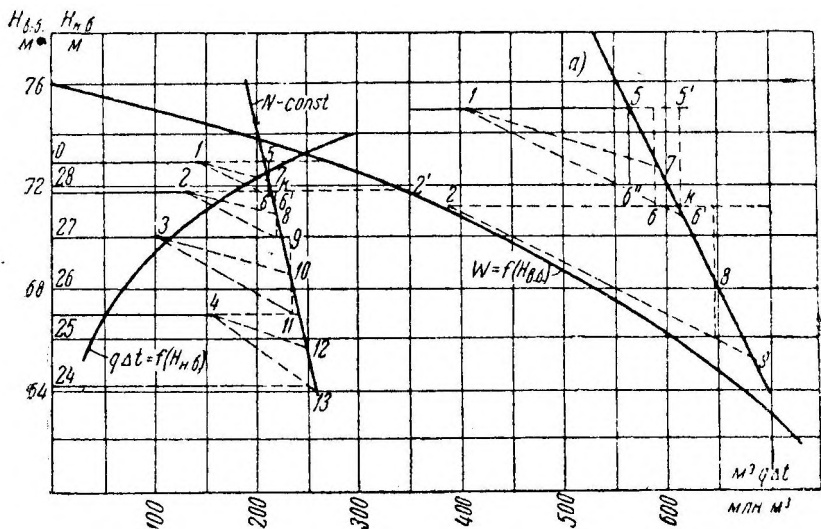


Рис. 17. График зависимости изменения расходов от уровня в водохранилище (по способу инж. Н. В. Мастицкого).

наивысшего подпорного горизонта, $H_{в.б.}$ — отметка верхнего бьефа. Далее, установив расчетный интервал времени Δt , на основании кривой расходов на чертеже наносится $q\Delta t = f(H_{н.б.})$, где q — бытовой расход воды, H — отметки нижнего бьефа. Также, как указано было в предыдущем параграфе, вычисляется и наносится на рисунок зависимость $N = F = (H_{в.б.} \cdot q)$ для ряда значений N . Имея таким образом подготовленный рисунок, переходят к графическому расчету регулирования.

Пусть на какой-либо момент времени в реке имеется горизонт воды верхнего бьефа $H_{в.б.}$ и бытовой расход q (средний за период Δt). Откладывая на уровне $H_{в.б.}$ от оси ординат величину $q \Delta t$, получим точку I . Продолжая абсциссу точки I до пересечения с линией N (обеспечиваемая мощность), получаем точку 5 , которой характеризуются величины регулируемого расхода R , необходимого для мощности N . Очевидно, избыточный расход $R - q$ должен быть заимствован из запасов водохранилища. Из точки I проводим линию $I-6$ параллельно касательной и кривой $W=f(H_{в.б.})$ в точке, определяемой начальной отметкой $H_{в.б.}$ Ордината $5-6''$ (см. деталь a) отвечала бы

сработке водохранилища и ордината точки b'' определила бы отметку водохранилища в конце интервала Δt , если бы величина регулируемого расхода R в течение выбранного интервала сохранялась постоянной. Так как при сработке водохранилища напор уменьшается, то к концу интервала Δt величина регулируемого расхода R_1 определится абсциссой точки пересечения линии $1-b$ с кривой $N = F(H_{e.б} q)_{e.б}$. Средний

регулируемый расход за интервал времени Δt будет равен $\frac{R + R_1}{2}$,

и соответственно ему определится и сработка водохранилища. Для этого разделяют отрезок на две равные части и из середины проводят вертикаль до пересечения с лучом $1-b$. Ордината точки b и дает по масштабу отметок верхнего бьефа отметку горизонта воды в водохранилище. На уровне (ордината) полученного горизонта воды откладывают опять абсциссу, равную произведению расхода в следующий интервал времени на Δt (точка 2). Продолжают абсциссу до пересечения с линией W (точка 2) и из точки 2 проводят линию 2-9 параллельно касательной к линии W в точке 2'. Разделив отрезок $k-9$ (рис. 17 а) на две равные части, проводят через середину (точку 8) вертикаль, пересечение которой с лучом 2-9 определяет отметку горизонта воды в водохранилище к концу второго интервала. Ход построения не меняется при наполнении водохранилища, т. е. для случая $q > R$.

Обоснование описанного построения следующее: при $q \neq R$, как уже указывалось выше, за период времени Δt может быть написано следующее уравнение неразрывности:

$$(q - R) \Delta t = \Delta W.$$

По ходу построения любой горизонтальный отрезок (абсцисса), например $0-1$, по величине равен $q\Delta t$, отрезок же $0-5$ выражает собой величину $R\Delta t$. Таким образом часть абсциссы $1-5$ равна $(q - R) \Delta t = \Delta W$. Так как луч $1-b$ параллелен соответствующей части линии $W = f(H_{e.б})$, то вертикаль $5-b''$ по построению равна понижению уровня водохранилища определяемого из графика $W = f(H_{e.б})$. Других способов, как менее интересных, касаться не будем.

§ 14. Основные задачи, решаемые помощью интегральных кривых.

Прежде чем переходить к рассмотрению отдельных задач, решаемых методом интегральных кривых, напомним, что для используемого водотока предварительно должны быть установлены другие водопользователи, кроме энергетики, и фиксированы потребные им расходы, как средне-годовые, так и по месяцам года. Эта потребность в воде должна быть покрыта, и только излишки воды могут быть обращены на энергетическое использование. Так как, в особенности для ирригации, расход воды в течение года неравномерен, то это должно найти отражение и в проектируемом регулировании стока. В отдельных задачах это обстоятельство будет отнечено.

а) Обеспечение заданного расхода (рис. 11 и 12). Для решения задачи проводят с верхней стороны к интегральной кривой касательные параллельные лучу, определяемому заданным расходом Q .

Наибольшая из ординат, заключенных между касательными и интегральной кривой, определяет необходимую емкость водохранилища. Пересечение касательной с интегральной кривой определяет момент наполнения водохранилища. Сбрасываемый объем воды равняется длине отрезка S в масштабе объемов, заключенного между предшествующей и последующей касательными.

б) Определение емкости водохранилища и регулированных расходов. Если необходимый расход не задан, то на чертеже интегральной кривой (рис. 12) проводят ряд касательных к верхним и нижним точкам перегиба, параллельно лучам, отвечающим различным расходам, и, сообразно с изложенным выше, определяют

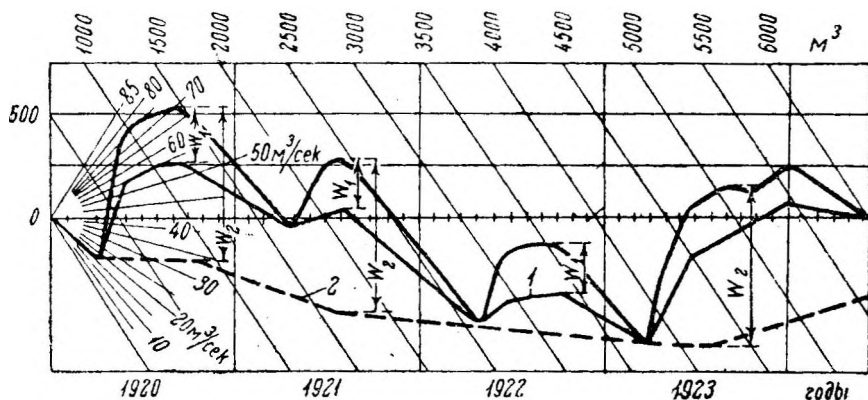


Рис. 18. Интегральная кривая стока и определение объемов водохранилищ.

необходимые емкости водохранилища W для обеспечения намеченных расходов R и строят зависимость $W = f(R)$ (рис. 15). На этот же график наносятся кривые площадей и объемов в зависимости от отметок. Природные условия определяют предельную емкость водохранилища, а следовательно, и предел регулируемого расхода. Обычно с приближением регулируемого расхода к средне-многолетнему необходимая емкость водохранилища быстро возрастает, что связано также со значительным возрастанием капитальных вложений. Окончательный выбор емкости водохранилища, как указано было выше, требует экономической проработки. Для этого выбирают несколько емкостей водохранилища W_1, W_2, \dots (три, четыре) и для каждой из них проводят интегральную кривую регулируемого стока (1, 2, ...) так, чтобы выбранная емкость не была превзойдена (рис. 18). На основании построенной интегральной кривой определяют величины регулируемых расходов, их длительность, ход изменения уровней горизонта воды водохранилища, напоров и мощностей водотока. По полученным данным составляются эскизные проекты использования водотока при разных емкостях водохранилища. Та емкость водохранилища, при которой стоимость энергии получается наименьшей, является экономически наиболее выгодной.

При проведении интегральной кривой регулируемого стока необходимо учитывать требования судоходства в отношении наинизших

отметок в навигационный период, а сброску воды в зимний период допускают только настолько, чтобы в любой год водохранилище было к началу навигации наполнено весенним стоком до наименьшей установленной для судоходства отметки.

в) Регулирование при преимущественном расходовании воды не для энергетики. На основании данных о потребных расходах воды для основного водопользователя выясняют, имеется ли в реке избыток воды для энергетического использования. Затем по построенной интегральной кривой естественного стока (рис. 20) определяют наиболее маловодный период. Для этого периода, пользуясь

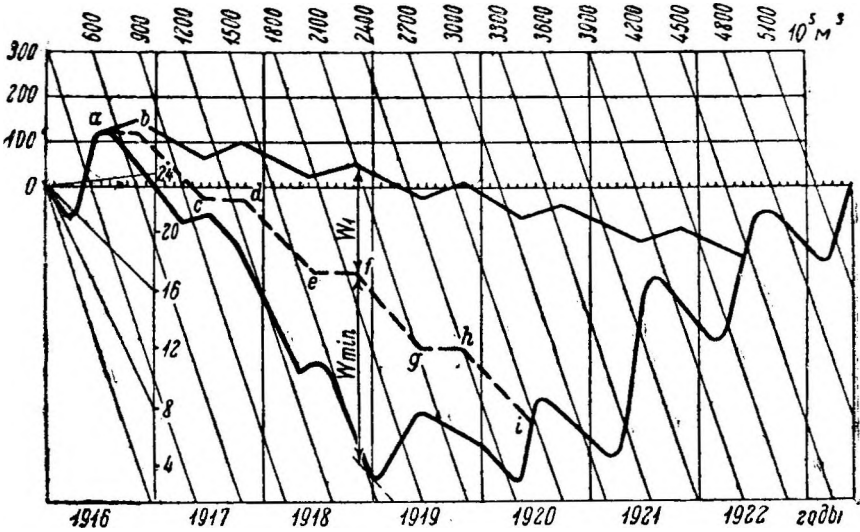


Рис. 19. Регулирование стока при преимущественно неэнергетическом водопользовании.

лучевым масштабом, строят интегральную кривую потребления воды основного водопользователя (рис. 19, линия abc) и определяют необходимую емкость водохранилища W_{\min} , при которой требования водопользователя, например ирригации, водоснабжения, могут быть обеспечены. Совершенно очевидно, что при наличии водохранилища емкостью только W_{\min} воды для энергетики дано быть не может. Если емкость водохранилища $W_0 > W_{\min}$, то для энергетики в маловодный период может быть использована избыточная емкость $W_1 = W_0 - W_{\min}$. На рис. 20 показана интегральная кривая регулируемого стока за маловодный период при емкости $W = W_{\min} + W_1$. Расход для энергетики в течение периода лет (1916 — 1922 гг.) предположен равномерный.

г) Регулирование стока несколькими последовательными водохранилищами. В общем случае решение поставленной задачи начинают с анализа интегральной кривой, построенной для створа нижнего водохранилища, по которой определяют необходимую суммарную емкость всех водохранилищ. Затем анализи-

руют интегральные кривые, начиная со створа верхнего водохранилища. Интегральные кривые должны быть построены с учетом регулирующего влияния выше расположенных водохранилищ. В тех случаях, когда модуль стока для всего бассейна однообразен, можно для всех водохранилищ воспользоваться одной интегральной кривой. Действительно, если модуль стока для рассматриваемого бассейна равен k , а площадь водосбора — F , то расход воды определится $Q = kF$. При поставленном выше условии равенство $Q = kF$ будет справедливо

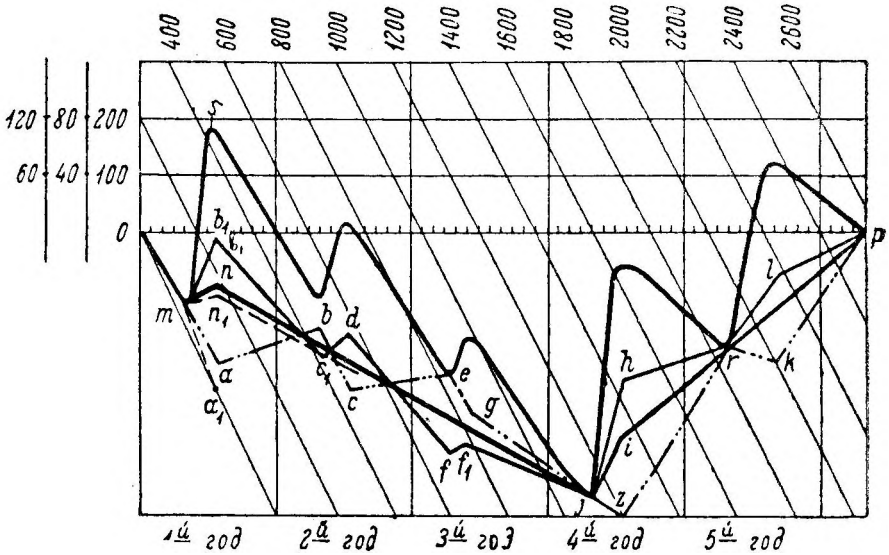


Рис. 20. Водохозяйственные расчеты при регулировании двумя водохранилищами.

для любой части бассейна. Если рассмотрению подлежат площади бассейна F_1 и F_2 , то соответственный сток с них будет:

$$S_1 = \int_0^t Q_1 dt = F_1 \int_0^t k dt; \quad (25)$$

$$S_2 = \int_0^t Q_2 dt = F_2 \int_0^t k dt = \left(\frac{F_2}{F_1}\right) F_1 k dt = \frac{F_2}{F_1} S_1. \quad (26)$$

Таким образом интегральная кривая, построенная для площади бассейна F_1 будет верна и для площади бассейна F_2 , если масштаб объемов изменить в отношении $F_2: F_1$.

На рис. 20 представлено регулирование стока реки двумя водохранилищами, расположенными последовательно. Суммарная площадь бассейна — F , а частные: для верхнего водохранилища — $F_1 = 0,4F$ и для низшего — $F_2 = 0,6F$. Согласно изложенному выше, при однообразии модуля стока интегральная кривая стока со всего бассейна

может быть использована и для частных бассейнов путем соответственного изменения масштаба объемов. Суммарный объем обоих водохранилищ для рассматриваемого случая принят $W = 300$ млн. м³. Объем верхнего водохранилища $W_1 = 180$ млн. м³ и нижнего — $W_2 = 120$ млн. м³. При объеме $W = 300$ млн. м³ регулированный сток в створе

нижней плотины определится интегральной кривой mn_jirp (рис. 20). Если гидростанция расположена у нижней плотины, то режим работы нижнего водохранилища необходимо по возможности наметить так, чтобы получить большие напоры — иными словами, срабатывать надо преимущественно верхнее водохранилище. Выясним работы каждого водохранилища. В весенний паводок 1-го года нижнее водохранилище наполняется полностью, и регулированный расход в этот период определяется линией mb . Если от интегральной кривой естественного стока отложить отрезок sa_1 , по величине равный объему верхнего водохранилища, то регулированный расход, характеризуемый линией ma_1 оказался бы отрицательным, т. е. приточность недостаточна для заполнения полной емкости водохранилища. При регулированном расходе $Q = 0$ наполнение объема окажется равным $sa < sa_1$. Таким образом наличный объем обоих водохранилищ окажется меньше 300 млн. м³ и интегральная кривая зарегулированного стока всей площади бассейна окажется $mnj...$ Для выполнения поставленного выше условия о преимущественной сработке верхнего водохранилища и сохранения запроектированного регулированного режима в нижнем створе необходимо к концу паводка 2-го года по возможности также наполнить нижнее водохранилище. Ход регулированных расходов в верхнем створе определяется интегральной кривой $mabc$. Действительно, положение точки d определяется условием пополнения нижнего водохранилища, положение же точки c получается автоматически, как разность объема, необходимого для регулирования суммарного стока (по линии nj) и полного объема нижнего водохранилища. Более интенсивная сработка верхнего водохранилища в период времени, отвечающий ab , позволила бы меньше сработать нижнее водохранилище, но оно в конце паводка 2-го года не смогло бы быть наполненным на объем, определяемый точкой c , что привело бы к неизбежному уменьшению суммарного расхода. Дальнейшие рассуждения аналогичны только что изложенным. Интегральная кривая регулированного стока верхнего водохранилища изображена линией $mabcgjzrkp$; для нижнего водохранилища соответственно линией $mnjirkp$ и, наконец, режим нижнего водохранилища определяется линией $mb_1c_1dff_jhrlp$.

д) Регулирование стока при каскадном расположении гидростанций. Если ниже водохранилища расположен ряд гидростанций, то может возникнуть вопрос о проектировании режима водохранилища таким образом, чтобы достигнуть наибольшего выравнивания суммарной выработки станций.

Совершенно очевидно, что при отсутствии боковой приточности

между отдельными установками расход, выпускаемый из водохранилища, будет проходить через все станции неизменным (если не учитывать суточного регулирования), и следовательно, мощность и выработка станций будут зависеть только от напора,

Иначе обстоит дело, если между отдельными установками имеется боковая приточность. При выпуске определенного расхода из водохранилища расход этот будет увеличиваться за счет боковой приточности, и, чтобы избежать сбросов и достигнуть желательного режима всех установок, необходимо запроектировать компенсированное регулирование.

Если для одной такой установки задача эта требует достаточно большой проработки, то для нескольких установок описанный выше метод становится затруднительным, а иногда и невозможным.

Более или менее удовлетворительное решение задачи может быть получено при применении следующего метода.

Пусть по длине водотока расположено n гидростанций, каждая с напором H_n , и между ними наблюдается боковая приточность $q_{n-1,n}$.

Если из водохранилища вытекает расход Q_1 , то, очевидно, суммарная мощность установок в киловаттах будет

$$\sum_1^n N_n = 8 [Q_1 H_1 + (Q_1 + q_{1,2}) H_2 + \dots + (Q_1 + \sum_1^n q_{n-1,n}) H_n], \quad (27)$$

а суммарная выработка за период времени t

$$\sum_1^n A_n = 8 \int_0^t [Q_1 H_1 + (Q_1 + q_{1,2}) H_2 + \dots + (Q_1 + \sum_1^n q_{n-1,n}) H_n] dt. \quad (28)$$

Рассматривая расход Q_1 как приточный расход в водохранилище, можно по равенству (28) построить интегральную кривую выработки. Построение производится в косоугольной системе, причем по оси абсцисс откладывается время, по оси ординат — выработка. Масштаб выбирается в зависимости от желаемой точности. Наклон линии нулевой выработки определяется так же, как это делалось при построении интегральной кривой притока.

Совершенно очевидно, что тангенс угла, образованного касательной с линией нулевой выработки, по величине своей равен мощности. Построенный нулевой масштаб будет таким образом масштабом мощностей.

При составлении проекта регулирования придется теперь пользоваться емкостью водохранилища, выраженной в киловатт-часах. Емкость водохранилища, выраженная в киловатт-часах, определяется из его объема по следующему выражению:

$$\frac{W \sum H_n}{450} = A_w, \quad (29)$$

где W —объем водохранилища в куб. метрах;

$\sum H_n$ — суммарный напор в метрах;

A_w — емкость водохранилища в киловатт-часах.

Задаваясь, по местным условиям, различными значениями IF или, что то же, значениями A_w , можно составить ряд схем регулирования и на основании их, по соображениям экономики, выбрать наиболее выгодное значение A_w и соответственно W .

Определив объем водохранилища и зная ход его изменения, можно построить энергетические характеристики для каждой из станций, а именно: ход изменений расходов, напоров и мощностей, а также и кривые их длительности,

е) Построение изменения объема водохранилищ, хода уровней и расходов. Имея интегральные кривые естественного и регулируемого стока, можно да и необходимо определить изменение емкости водохранилища и ход уровней воды в нем.

На основании изложенного выше разность ординат между интегральными кривыми естественного и регулируемого стока представляет собой в выбранном масштабе наличный объем воды в водохранилище. Строя эти объемы в календарной последовательности,

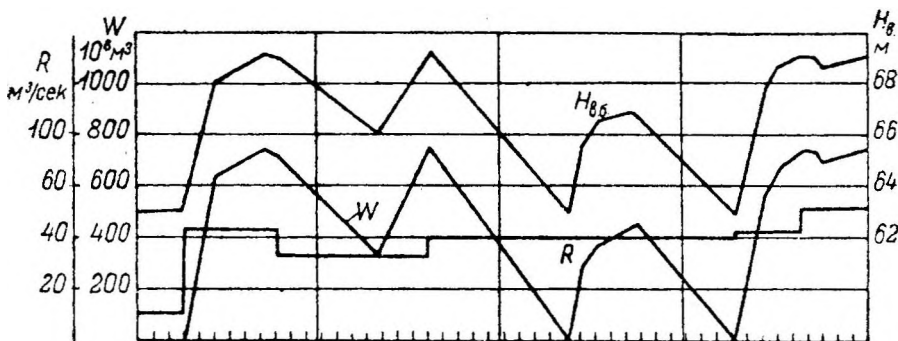


Рис. 21. Календарные графики уровней ($H_{в.б.}$), объемов водохранилища W и регулируемых расходов R .

получаем кривую изменения объемов водохранилища. Пользуясь этой кривой, а также кривой зависимости объемов от отметок, легко построить кривую изменения горизонта воды (рис. 21). На основании той же интегральной кривой регулируемого стока по масштабу расходов определяются величины регулируемых расходов и затем строится их гидрограф (рис. 21).

§ 15. Значение прогноза режима водотока при регулировании.

При проектировании регулирования стока пользуются интегральной кривой стока, и таким образом режим стока за весь период регулирования является наперед известным. При реальном водопользовании режим водотока наперед не является известным, и поэтому назначение регулируемых расходов по проекту, за исключением регулирования средненголетнего расхода (многолетнее регулирование) и постоянно обеспеченного расхода (годовое регулирование), может привести к значительным осложнениям и сбросам воды. Сказанное позволяет назвать регулирование по наперед известному режиму "идеализированным", и его возможно осуществить только при заблаговременном получении точного долгосрочного прогноза режима водотока (на месяц и более).

Современное состояние знаний не позволяет в ближайшее время ожидать такой организации прогнозов, в особенности долгосрочных, при которой предсказанный режим в действительности оправдался бы. Поэтому инженерная мысль стремилась при проектировании регулирования стока найти достаточно надежные указания, по которым была бы возможность назначить наперед регулированный расход.

Наиболее простое решение получается в том случае, если плотина, образующая водохранилище, может пропустить наибольший приточный расход, и, следовательно, регулирования расходов весеннего половодья не требуется.

При регулировании постоянно-обеспеченного расхода или так называемого гарантированного расхода полный объем водохранилища будет использован полностью только в самый маловодный период; в остальные же годы, со стоком выше максимального, водохранилище будет срабатывать только частью, что, конечно, понижает величину полезно используемого стока. В этом случае обычно применяют сезонную регулировку. Для этой цели по расчетному (самому маловодному) году устанавливают на определенные моменты времени (например, на каждое первое число месяца) необходимый объем водохранилища, при котором гарантированный расход обеспечен. Если в какой-либо год на тот же момент времени объем воды в водохранилище больше, чем для расчетного года, то избыток воды может быть обращен на увеличение регулированного расхода. Обычно избыточный объем водохранилища расходуется равномерно в течение времени от взятого момента до начала весеннего паводка.

Если намеченный объем водохранилища W больше объема W_0 , необходимого для регулирования гарантированного расхода, то в годы, по водности большие, чем расчетный, водохранилище будет наполнено на некоторый объем $W > W_0$. Избыточный объем $W_1 - W_0$ может быть использован для повышения гарантированного расхода.

Интересный метод построения диспетчерского графика для этого случая, а также и методику регулирования дает инж. П. А. Ляпичев.¹ Обозначая через S_0 сток расчетного (самого маловодного) года и соответственно S_0^0 — весенний сток и S_M^0 — меженный сток того же года, можно написать:

$$S_0 = S_0^0 + S_M^0.$$

Принимая за гарантированный расход средний расход расчетного года $Q_0 = \frac{S_0}{T}$, где T — число секунд в годовом периоде, получаем величину необходимой емкости, гарантирующей расход Q_0 :

$$W_0 = Q_0 t_M - S_M^0.$$

В этом равенстве t_M — число секунд в меженном периоде (включая и зимний период).

Регулированный сток (отдача) за период межени определяется

$$V_M^0 = Q_0 t_M = W_0 + S_M^0. \quad (30)$$

¹ "Гидротехническое строительство" № 7, 1936.

Если наличный объем водохранилища $W_e > W_0$, то в какой-либо год, с водностью больше расчетного, наполнение водохранилища будет $W_m > W_0$ причем $W_m < W_e$. Очевидно, что в такой год регулируемый расход может быть увеличен до величины

$$Q_m = Q_0 + \frac{W_m - W_0}{t_m}$$

и регулируемый сток за период межени окажется равным

$$\begin{aligned} V_m &= W_m + S_{.u}^0 = \\ &= V_{.u}^0 + W_m - W_0. \end{aligned} \quad (31)$$

Наибольшее значение регулируемого стока определится из равенства (31), если в нем вместо W_m подставить значение наличной емкости W_e .

Равенство (31), представленное графически, дает правило назначения гарантированной величины регулируемого стока (отдачи) на

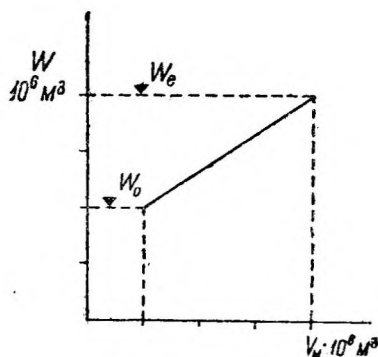


Рис. 22. Зависимость гарантированного стока (отдачи) от объема водохранилища (по П. А. Ляпичеву),

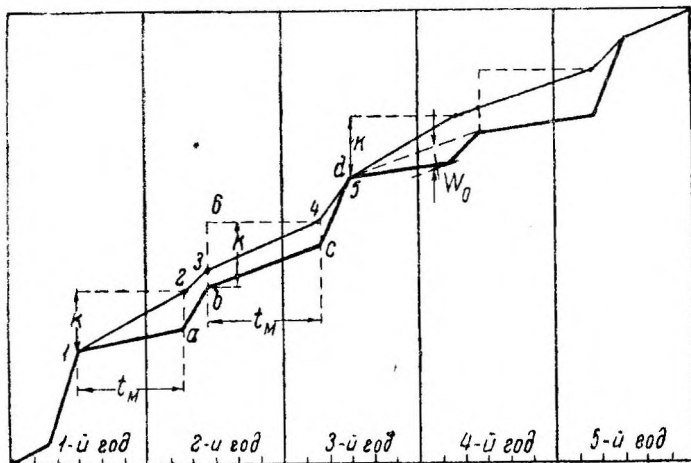


Рис. 23. Регулирование стока по методу инж. П. А. Ляпичева (прямоугольные координаты).

весь меженный период в зависимости от наполнения водохранилища к концу весеннего паводка (рис. 22).

Для самого водохозяйственного проектирования инж. П. А. Ляпичев предлагает следующую методику. На основании равенства (31) вычисляется максимальный регулируемый сток (отдача):

$$k = \max V_m = V_{.u}^0 + (W_e - W_0) \quad (32)$$

Имея к концу весеннего паводка 1-го года водохранилище наполненным (рис. 23), накальвают сверху от интегральной кривой на этот момент времени величину k и тем самым на рисунке получают величину суммарного стока, которая может быть гарантирована к началу

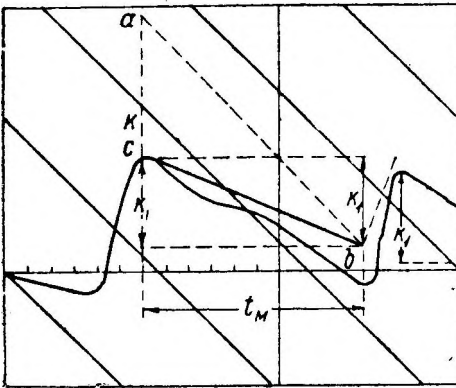


Рис. 24. Регулирование стока по методу инж. П. А. Ляпичева (косоугольные координаты).

паводка следующего года. Переноса (см. рис. 23) точку k на ординату, характеризующую время начала паводка следующего года, получим точку 2, соединив которую с точкой 1, получаем интегральную кривую гарантированного стока. Если к концу паводка 2-го года полезный объем водохранилища наполнен полностью, то построение интегральной кривой на будущий межливневый период производится только что описанным методом. Если к концу весеннего паводка водохранилище не наполнилось (рис. 23, точка 3), то величина гаранти-

рованного стока определится из равенства (31), в котором W_m представляет собой наполненный паводком объем водохранилища.

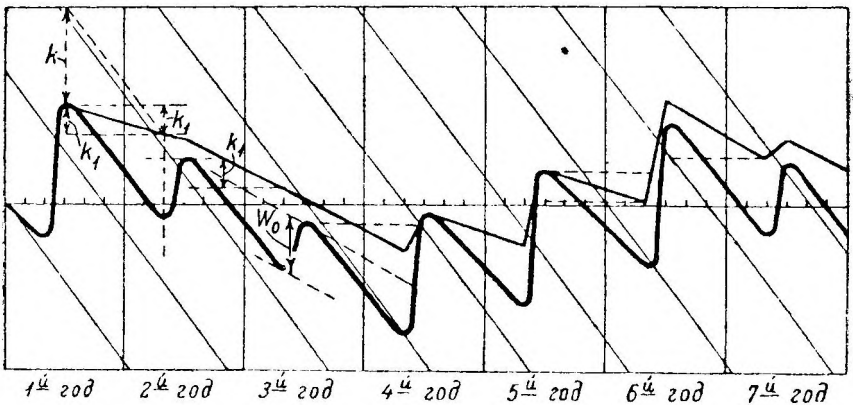


Рис. 25.

Из рис. 23 имеем, что ненаполненная часть емкости и водохранилища равна $\Delta W = 3 - b$, и, следовательно,

$$W_m = W_e - \Delta W = \overline{b \cdot 6} - \overline{b \cdot 3}.$$

Таким образом для определения гарантированного межливневого стока и для случая ненаполненного водохранилища необходимо от интегральной кривой естественного стока в момент конца весеннего паводка

(рис. 23, точка *b* 2-го года) отложить вверх величину *k* и порченную точку (точка *b*) спроектировать на вертикаль, проходящую через начало паводка следующего года (точка *4*). Линия, соединяющая обе точки (*3* и *4*) и будет интегральной кривой гарантированного регулируемого стока.

Применение этого метода к интегральной кривой, построенной в косугольной системе координат, показана на рис. 24 и 25. Отложив величину *lc* в момент наполнения над интегральной кривой стока вверх, получаем величины гарантированного регулируемого стока к концу меженя. Для переноса полученной точки *a* (рис. 24) на момент времени, соответствующий началу паводка следующего года, необходимо из точки *a* провести линию, параллельную нулевому расходу, до пересечения с вертикалью, проходящей через интересующий нас момент времени в точке *b*. Соединяя точку *b* с точкой *c*, получим прямую, характеризующую гарантированный расход. Ту же точку *b* можно получить и проще, если вычислить величину k_1 , которая равна разности стока гарантированного и стока при расходе, определяемой горизонтальной линией в течение периода t_m . Величина k_1 может быть отрицательной, и тогда она откладывается вниз (рис. 24 и 25); если она положительна, то она откладывается вверх. Нахождение ее графически ясно из рис. 24. Так как регулирование прогноз-

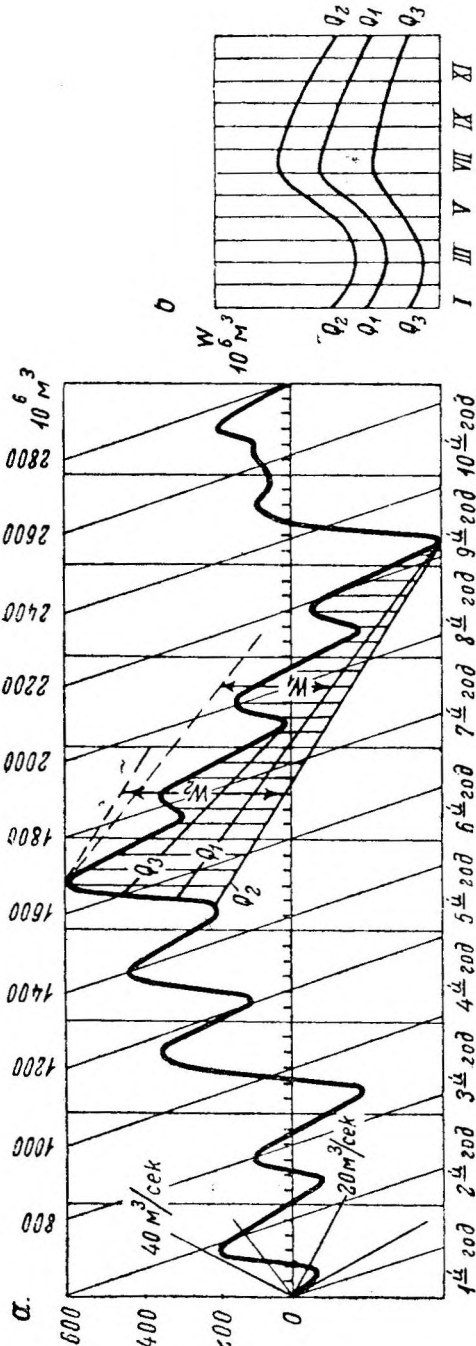


Рис. 26. Построение диспетчерского графика для регулирования месячных расходов (по Менкелю и Криккому).

ное, то необходимо наперед установить величину t_m , т.е. длительность межени (включая и зимний период). Время это находится из анализа гидрологических данных, причем для большей осторожности выбирается

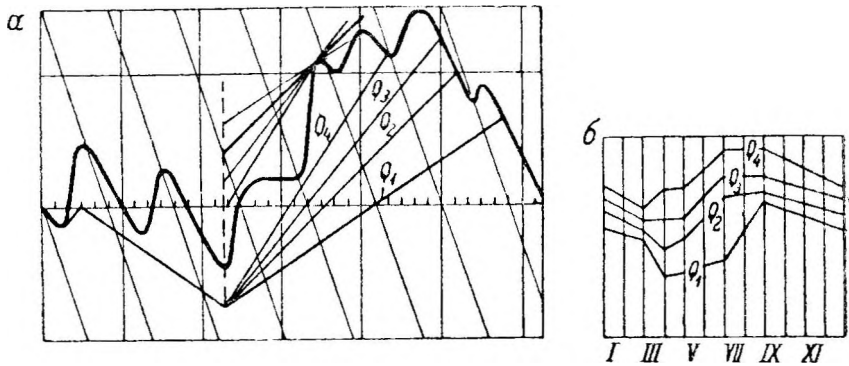


Рис. 27. Построение диспетчерского графика для регулирования паводочных расходов (по Менкелю и Крицкому).

наиболее длительный период. Если на какой-либо момент времени наполнение водохранилища больше, чем на тот же момент для расчетного маловодного года,

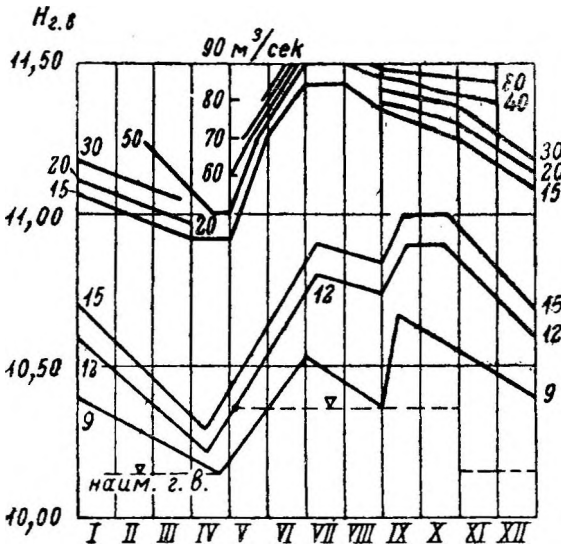


Рис. 28. Диспетчерские графики для шведских озер (по Самшио).

то инж. П. А. Ляпичев применяет дополнительное сезонное регулирование, расходуя избыточную емкость равномерно до начала следующего половодья, т.е. согласно принципам, изложенным выше.

Инженеры Менкель и Крицкий¹ для случая работы водохранилища, т.е. регулирования межени расходов, предлагают построение специального графика (диспетчерского) на основании анализа расчетного маловодного периода. Для этой цели проводят к интегральной кривой

естественного стока касательные, параллельно лучам обеспечиваемых расходов Q_1 , Q_2 и Q_3 (рис. 26, а). Анализируя по интегральным кривым есте-

¹ Инж. С. Н. Крицкий и инж. М. Ф. Менкель. Регулирование речного стока с переменной отдачей "Гидротехническое строительство" № 3 и 4, 1935.

ственного и зарегулированного стока ход изменения объемов водохранилища по месяцам, можно установить, что увеличение гарантированного расхода возможно только в том случае, если наполненный объем водохранилища превышает величину W , которая при многолетнем регулировании обычно определяется 1-м годом периода маловодных лет. Изменение предельных объемов водохранилища, необходимых для обеспечения заданного регулируемого объема, может быть по-

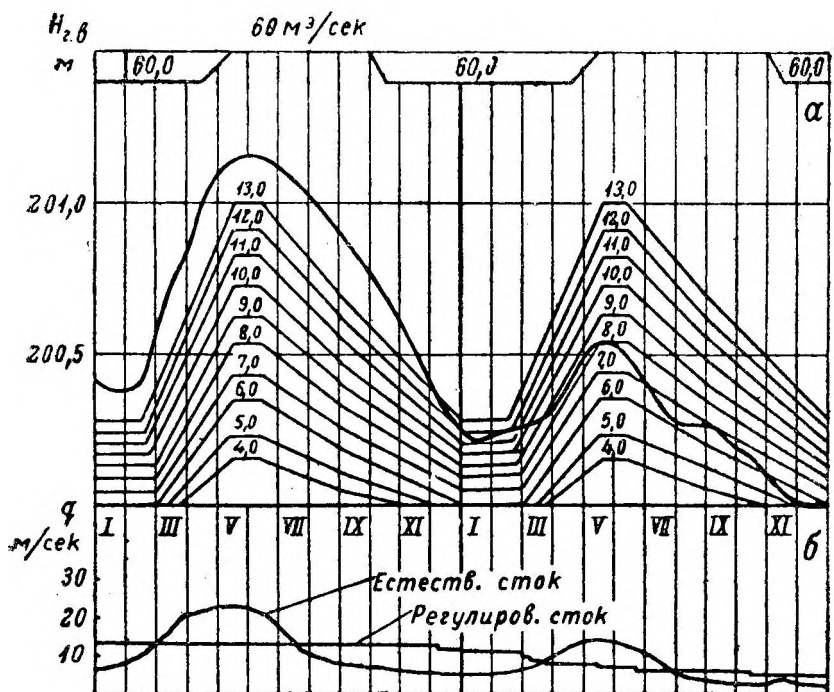


Рис. 29. Диспетчерские графики для шведских озер (по Самшио).

строено графически. Для этого на рис. 26,б по оси абсцисс откладывают в календарной последовательности месяцы, а по оси ординат объемы и накальвают для каждого месяца наибольший объем, определенный для интегральной кривой за расчетный период при регулировании заданного расхода. Соединив полученные точки плавной кривой, которая ограничивает зону объемов водохранилища, в пределах которой из водохранилища может выпускаться гарантированный расход. Если на какой-либо момент времени наличный объем водохранилища превышает предельный для этого момента времени, то регулируемый расход может быть увеличен.

Совершенно такое же построение диспетчерского графика инженеры Менкель и Крицкин предлагают и для регулирования паводочных (высоких) расходов. В этом случае на основании интегральной кривой естественного стока определяется зависимость между незаполненным

на данный момент времени объемом и заданным расходом, при котором не произойдет переполнения водохранилища (рис. 27).

Инж. П. А. Ляпичев дает для определения регулируемого расхода на время весеннего наводка зависимость

$$Q_a = Q_0 + \frac{W_a + S_a - S_a^0}{t_a}, \quad (33)$$

в которой:

- t_a — длительность весеннего стока в сечениях;
- Q_0 — гарантированный расход;
- W_a — неиспользованный к началу весеннего паводка объем водохранилища;
- S_a^0 — весенний сток самого маловодного года;
- S_a — предсказанный весенний сток предстоящего весеннего наводка

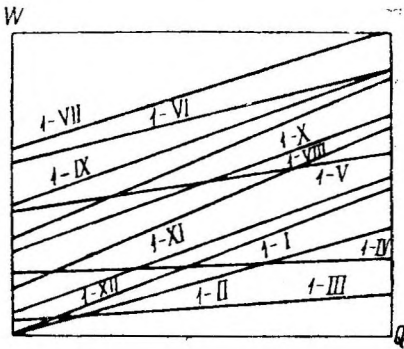


Рис. 30. Диспетчерский график (по Кесслеру).

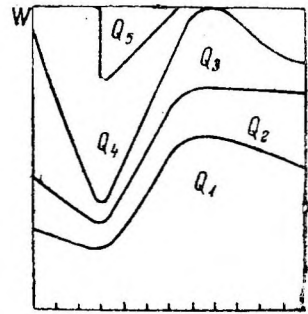


Рис. 31. Диспетчерский график (по Менкелю и Криккому).

Оценка ожидаемого объема (стока) весеннего наводка возможна, но предсказание длительности стока чрезвычайно трудно и обычно малодостоверно. Поэтому длительность t_a приходится устанавливать на основании имеющегося ряда лет гидрометрических наблюдений с достаточной осторожностью. Имея t_a , можно по формуле (33) вычислить регулируемый сток за весенний период и при построении интегральной кривой регулируемого стока применить метод инж. П. А. Ляпичева, описанный выше.

В практике регулируемого стока при устройстве водохранилищ в естественных озерных котлованах обычно приходится считаться как с регулированием меженного, так и весеннего стока. Методикой такого регулирования особенно много занимались шведские инженеры. На рис. 28 и 29 представлены диспетчерские графики, разработанные инж. Ф. Самшио¹ для регулирования озер в Швеции. Инж. Кесслер²

¹ A. L u d i n , Die nordische Wasserkraft, 1934.

² "Engineering News Record" № 20, 1926.

придает диспетчерскому графику иную форму (рис. 30), причем график этот представляет зависимости между наличным объемом воды в водохранилище на данное число (обычно первое число месяца) и регулируемым расходом. Такие же диспетчерские графики можно получить, пользуясь методом, описанным инж. Мепкель и инж. Крицвим (см. выше). Для этой цели необходимо совместить графики, полученные при регулировании меженного и весеннего стоков (рис. 31). Можно диспетчерский график построить также на основании анализа всех лет регулирования стока по наперед известному режиму. Этот прием применяется только при регулировании переменным расходом, при каком получается наиболее полное использование стока. Для этого по интегральным кривым естественного и зарегулированного стока определяют для периода сработки на каждый месяц (или какой-нибудь другой срок) объемы водохранилища, гарантирующие принятые в проекте регулирования расходы и по ним строят предварительный диспетчерский график сработки (рис. 32). То же производится и для периода наполнения, причем в этом случае определяют те емкости, которые при назначенных расходах гарантируют водохранилище от переполнения. На основании полученного графика производят вторичный расчет,

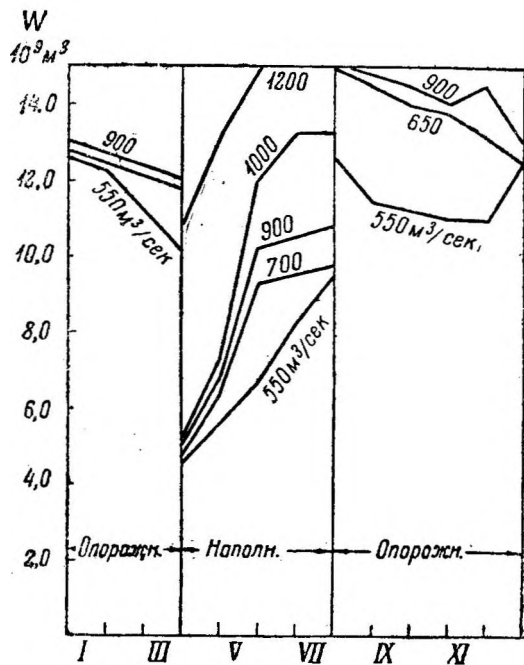


Рис. 32. Диспетчерские графики.

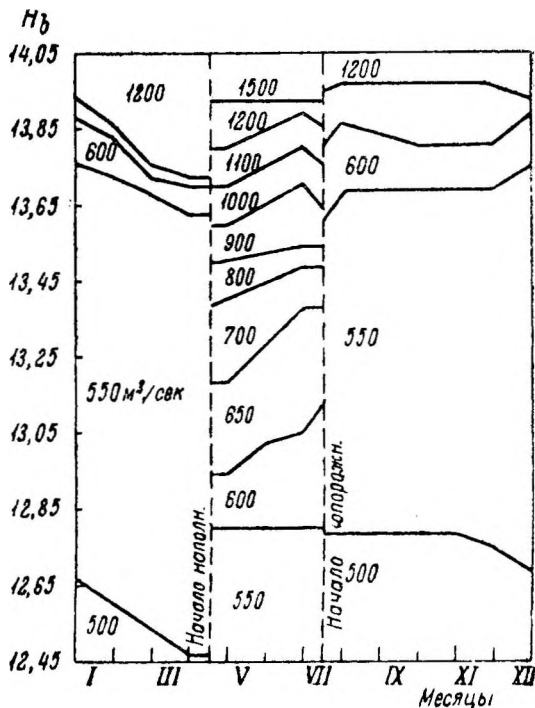


Рис. 33. Пример диспетчерского графика многолетнего регулирования.

считая режим наперед неизвестным, и вносят в предварительные графики возможные изменения и дополнения. Полученный таким образом окончательный график и может быть рекомендован для эксплуатации (рис. 33). Рекомендуемый график необходимо проверить на разных по водности группах лет, учитывая возможные сроки окончания строительных работ, а следовательно, и разные даты начала наполнения водохранилища.

Имея данные таблицы или график, назначают регулируемый расход на выбранный интервал времени вперед, сообразно наличным запасам воды в водохранилище на первое число рассматриваемого месяца.

§ 16. Учет вредных потерь в расчетах по регулированию.

Понижение или повышение положения горизонта воды в водотоке имеет следствием изменение режима грунтовых вод, вызывая либо понижение, либо повышение их природного уровня.

В последнем случае, в зависимости от местных гидро-геологических условий, может иметь место инфильтрация воды из водоема в грунт, причем размер фильтрации зависит от строения, состояния и свойств слагающих ложе водотока пород. Если фильтрация и ее размеры на периферии водоема зависят от того, имелись ли до создания водохранилища грунтовые воды и каково было их высотное положение в естественных условиях, то фильтрация под основанием и в местах сопряжения плотины с берегами в той или иной мере имеет место всегда.

Таким образом можно установить, что в результате создания водохранилища (при регулировании вверх) некоторая часть воды будет теряться, причем размеры этих потерь зависят от местных гидро-геологических и геологических условий. Потери на фильтрацию можно считать зависящими от напора, а следовательно и емкости водохранилища. В общем случае величину годовой потери по фильтрации можно принять равной

$$\Delta\omega_{\phi} = (\mu_1 + \mu_2)W$$

где $\Delta\omega_{\phi}$ — потерянный на фильтрацию объем воды в куб. метрах;

μ_1 — коэффициент, учитывающий фильтрацию по контуру всего водоема;

μ_2 — коэффициент, учитывающий фильтрацию под плотинной.

Табл. 23 показывает, каких значительных размеров может достигнуть фильтрация из водохранилища.¹

Численные значения коэффициентов μ_1 и μ_2 могут быть намечены только при наличии достаточно подробных материалов гидро-геологических исследований.

Ориентировочно для самых предварительных расчетов можно принять:

$\mu_1 = 0$, если горизонт воды водохранилища не превышает уровня грунтовых вод в пределах бассейна водохранилища;

¹ Данные заимствованы из книги А. А. К о р о л е в а, Метод регулирования стока при учете вредных потерь.

$\mu_1 = 0,01—0,20$, в зависимости от геологического строения чаши водохранилища, если горизонт воды водохранилища подымается выше уровня грунтовых вод прилегающего района;

$\mu_2 = 0,005 — 0,025$, в зависимости от геологических условий в месте расположения плотины.

Таблица 23

№ п/п	Название водохранилищ	Потери в процентах от годового стока		
		Фильтрация	Испарение	Сумма
1	East Parke	—	11	—
2	Gold Spring	15	9	24
3	Deer Flat	61	9	70

Дальнейшие потери связаны с увеличением площади зеркала воды водохранилища. Увеличение водной поверхности сопряжено с увеличением испарений, на что, конечно, расходуется соответствующее количество воды. Однако было бы неправильно в качестве потерь считать весь испаряющийся слой, так как испарение имело место также и в естественных условиях с незанятых водою площадей.

Сказанное позволяет предложить следующую формулу подсчета потерянного на испарения количества воды:

$$\Delta S_{исп} = 1000 [e - (1 - \varphi) A] F, \quad (35)$$

где ΔS — потерянный на испарение объем воды в куб. метрах:

e — испаряющийся слой с водной поверхности в миллиметрах;

A — слой выпавших осадков в миллиметрах;

φ — коэффициент стока;

F — дополнительно залитая водой площадь в кв. километрах.

Все величины, входящие в формулу (35), должны быть отнесены к одному периоду.

Средний потерянный на испарение расход

$$q_{исп} = \frac{\Delta S_{исп}}{t} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (36)$$

где t — длительность периода в секундах.

Если непосредственных данных наблюдений над испарением не имеется, то величину испаряющегося слоя можно приближенно определить, пользуясь формулой Мейера:

$$e = d(15 + 3\omega) \text{ мм/мес}, \quad (37)$$

где $d = V - v$ — дефицит влажности в миллиметрах;

ω — средняя скорость ветра в м/сек;

V — максимальная упругость паров в миллиметрах, соответствующая средней месячной температуре воздуха;

v — средняя месячная абсолютная влажность в миллиметрах.

Имея по проекту регулирования ход уровней водохранилища, можно было бы на каждый месяц определить дополнительную площадь, залитую водой, пользуясь для этого кривой зависимости площадей от отметок, и затем на каждый месяц определять потерянный на испарение расход. Однако такой прием не дает хороших результатов, так как месячные величины коэффициента стока ϕ крайне изменчивы и трудно определимы. Поэтому возможно при годовом и особенно многолетнем регулировании ограничиться подсчетом годовых потерь и считать потерянный расход распределенным равномерно в течение года или пропорционально месячным величинам испарений. Дополнительная площадь, залитая водой, определяется по средне-годовому уровню водохранилища.

Наконец, третий вид потерь имеет временный характер и относится к зимнему периоду. На ледообразование затрачивается часть воды, которая восстанавливается только весной — после таяния льда. Потери на ледообразование в куб. метрах могут быть подсчитаны по следующей формуле:

$$\Delta S_{\text{л}} = 0,9Fh, \quad (38)$$

где h — толщина льда в метрах;

F — дополнительно залитая водой площадь в кв. метрах.

При подсчете потерь суммируются только потери на фильтрации и испарения; что касается потерь на ледообразование, то таковые учитываются в перераспределении зимних и весенних расходов, причем из зимних расходов эти потери вычитаются, а к весенним они прибавляются.

§ 17. Решение отдельных задач с помощью специальных приемов и применения теории вероятности.

При многолетнем регулировании стока единственным методом, дающим быстрое и наглядное решение, является метод интегральных кривых. Этот же метод в применении к годовому и сезонному регулированию позволяет произвести анализ на предмет внесения соответственных поправок для реального регулирования. Часто, однако, для годового регулирования рассмотрение ограничивается только характерными годами (см. выше). В этом случае возможно применение иных методов проектирования регулирования, без применения интегральных кривых. Из этих методов мы ограничились описанием лишь метода, предложенного инж. Мاستицким. Перейдем теперь к рассмотрению приемов, основанных на применении методов математической статистики. В водохозяйственных расчетах для энергетического водопользования методы математической статистики имеют место главным образом для следующих случаев:

- 1) Определение наибольших и наименьших расходов;
- 2) Расширение ряда лет для используемого водотока по хорошо изученному водотоку с подобными географо-гидрологическими характеристиками (аналог);
- 3) Определение наибольшего наводочного притока при решении задачи о трансформации наводочного стока (см. ниже).

Задача решается применением кривых распределения (см. § 6), которые характеризуются коэффициентами вариации C_v и несимметрии C_s . Коэффициенты эти вычисляются по формуле:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (k-1)^2}{n-1}}; \quad (3)$$

$$C_s = \frac{\sum (k-1)^3}{(n-1) C_v^3}, \quad (39)$$

где k — модульные коэффициенты для каждого года:

n — число лет.

Фостер рекомендует принимать $(C_s = 2C_v)^1$ (см. § 6).

Для каждого частного случая кривая обеспеченности может быть построена по данным табл. 3.

Для определения распределения интересующих величин (например наибольшего или наименьшего расходов) выписывают ив всех лет наблюдения изучаемую величину, вычисляют среднее ее значение и затем определяют модульные коэффициенты k , равные отношению анализируемой величины для каждого года к средней. Далее, пользуясь формулами (3) и (38), определяют C_v и C_s , по табл. 3 выписывают значения модульных коэффициентов для разной обеспеченности и по ним определяют характерные значения изучаемой величины.

Для расширения ряда лет для используемого водотока по аналогу исходят из предположения, что на обоих водотоках обеспеченность среднегодовых расходов одна и та же.

Для обоих водотоков определяют C_v и C_s и вычисляют модульные коэффициенты в зависимости от обеспеченности (лучше это изображать графически). Затем, определяя для каждого года для аналога (соседнего водотока, находящегося в одинаковых физико-географических условиях) процент обеспеченности, находят по таковому модульный коэффициент, а следовательно и величину среднегодового расхода для изучаемого водотока.

Инженеры Менкель и Крицкий предложили применение теории вероятности к определению многолетней емкости водохранилища. Сущность метода в основных чертах заключается в следующем: если годовые стоки выразить через модульные коэффициенты k , представляющие собой отношение стока любого года к среднемуголетнему, то

¹ По анализу Д. Л. Соколовского наименьшее значение $C_s = 2C_v$. Поданным инж. Менкель и Крицкого наибольшее значение

$$C_s = \frac{2C_v}{1 - \frac{S_{\min}}{S_{\text{ср}}}}$$

где S_{\min} — наименьшее значение наблюдаемой величины;

$S_{\text{ср}}$ — среднее значение наблюдаемой величины.

емкость водохранилища, необходимая для полного многолетнего регулирования, в долях среднемноголетнего стока выразится величиной

$$Z = (1 - k_1) + (1 - k_2) + \dots + (1 - k_n) = n \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^n k}{n} \right). \quad (40)$$

Инженеры Менкель и Крицкий доказывают, что величина $\frac{\sum_{k=1}^n k}{n} = k^{(n)}$ может быть определена по кривой распределения, которая характеризуется коэффициентами вариации и несимметрии

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \quad \text{и} \quad C_s^{(n)} = \frac{C_s}{\sqrt{n}}, \quad (41)$$

где C_v и C_s — коэффициенты вариации и несимметрии для используемого бассейна;

n — число лет.

Таким образом для регулирования среднемноголетнего расхода необходимая емкость в долях среднемноголетнего стока определится из выражения:

$$Z = n [1 - k^{(n)}]; \quad (42)$$

при регулировании расхода, равного a (в долях среднемноголетнего расхода) это выражение примет следующий вид:

$$Z = n [\alpha - k^{(n)}]. \quad (43)$$

Учитывая влияние периодичности гидрологических явлений, инж. П. А. Ефимович предлагает вместо формулы (41) пользоваться выражением:

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + 2 \frac{n-1}{n} r_1 + \frac{n-2}{n} r_2 + \frac{n-3}{n} r_3} \quad (44)$$

где r_1 — коэффициент корреляции между стоками смежных лет;

r_2 — то же между стоками через год;

r_3 — то же между стоками через два года.

Применение формулы (42) (случай многолетнего регулирования) не может быть рекомендовано, так как по этой формуле увеличением ряда лет емкость водохранилища непрерывно возрастает, что, конечно, не может соответствовать действительности.

Применение формулы (43) (регулирование некоторой доли многолетнего расхода) требует осторожности, так как иногда дает преуменьшенные результаты.

§ 18. Расчетные характеристики зарегулированного режима.

В § 3 перечислены основные характеристики, которые должны быть получены в результате водохозяйственного проектирования. На рис. 34 показан календарный ход уровней верхнего и нижнего бьефов, напоров, расходов и мощностей.

При помощи построенных таким образом графиков строятся кривые длительности мощностей, напоров и регулированных расходов, на основании которых и производятся дальнейшие энергетические расчеты. Обращается внимание, что величины расходов должны браться за вычетом всех потерь и потребностей в воде других водопользователей, забирающих воду из верхнего бьефа.

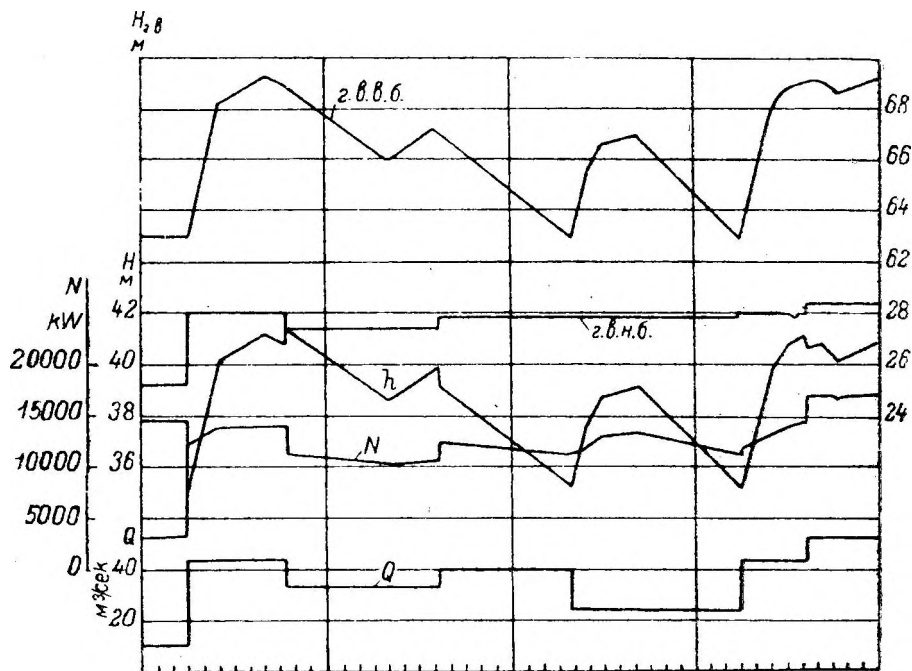


Рис. 34. Календарный график регулированных уровней, напоров, расходов и мощностей.

Для характеристики регулируемого режима следует всегда вычислять коэффициент использования стока, представляющий собой отношение полезно используемого ко всему годовому стоку (среднегодовому), и коэффициент, характеризующий степень зарегулированности стока,

а именно отношение $\frac{R_{\min}}{Q_{\text{ср}}}$. На основании проекта регулирования определяются также характерные расходы для расчета гидротехнических сооружений.

§ 9. Трансформация паводочного стока.

При создании водохранилищ особое внимание должно быть уделено определению наибольшего расхода, нормирующего пропускную способность плотины. Дело в том, что согласно равенству (21) при наличии озера в естественном состоянии, а также иногда для рек со значительными поймами приточный расход во время паводка всегда больше

сточного, при создании же озера вновь, наоборот, сточные расходы могут уменьшаться сравнительно с естественным. Если в процессе работы водохранилища возможен случай, что водохранилище будет наполнено до окончания прохода паводка, то приточный расход может оказаться значительно больше естественного наблюдаемого. Чтобы назначить безусловно достаточное отверстие плотины, необходимо произвести анализ работы водохранилища при приеме паводка и так определить сбросный расход, чтобы в самом невыгодном гидрологическом случае переполнение водохранилища не могло иметь места.

Для этой цели на основании проекта регулирования определяют наивысшую отметку горизонта воды водохранилища перед на началом

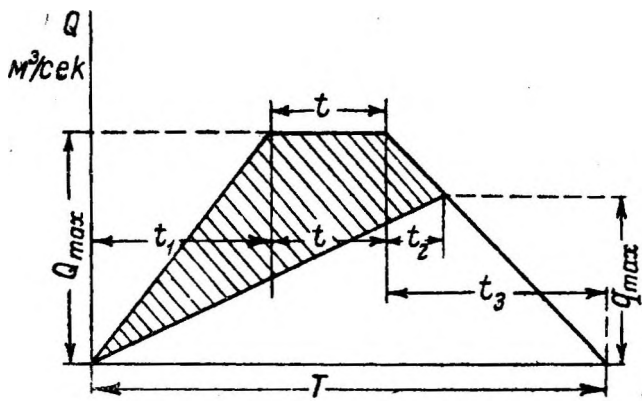


Рис. 35. Типовой график паводка.

паводка. Затем из гидрометрических материалов для каждого года устанавливают длительность T и объем V паводка.

Располагая объемы паводка в нисходящем порядке методом математической статистики, устанавливают кривую распределения и по ней определяют катастрофический объем паводка (один из 1000 и один из 100). Таким же образом вычисляется величина катастрофического расхода Q_{max} , которая, в случае надобности, может быть также подсчитана согласно данным, приведенным в табл. 5.

Задаваясь распределением паводочных расходов по закону трапеции,¹ можно подсчитать длительность катастрофического расхода:

$$t = \frac{2V}{Q_{\text{max}}} - T. \quad (45)$$

Установив распределение расходов паводка (рис. 35), на чертеже наносят линию изменения расходов через плотину.

Инженер Д. И. Кочерин показал, что предположение линейного изменения расходов дает результаты, весьма близкие к действитель-

¹ Д. И. К о ч е р и н . Определение отверстий искусственных сооружений с учетом хода паводочного притока и наполнение пруда.

ности. Приняв такое предположение о сбросных расходах, можем написать основное уравнение баланса стока — притока воды:

$$\sum_0^T (Q - q) \Delta t = W. \quad (46)$$

Применительно к рассматриваемому паводку (рис. 35) написанное сравнение примет вид:

$$Q_{\max} \frac{T+t}{2} - q_{\max} \frac{T}{2} = W \quad (47)$$

или

$$q_{\max} \left(\frac{V}{Q_{\max}} - \frac{t}{2} \right) = V - W. \quad (48)$$

Из рис. 36 усматривается, что $q_{\max} < Q_{\max}$ в том случае, если объем водохранилища для приема паводка

$$W > \frac{Q_{\max} t}{2}.$$

Так как $W = f(h)$, а $q = f(h, b)$, то, очевидно, каждому значению $W = f(h)$ будет удовлетворять вполне определенная ширина водосливных отверстий b .

Для водосливных плотин расход в зависимости от толщины переливающегося слоя определяется из выражения:

$$q = Mbh^{3/2}, \quad (49)$$

где M — коэффициент расхода;

b — ширина отверстий в метрах;

h — высота переливающегося слоя в метрах.

Для периода времени Δt баланс стока — притока будет:

$$\left[Q_{cp} - Mb \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right)^{3/2} \right] \Delta t = \Omega_h \Delta h, \quad (50)$$

а за весь период времени в течение $Q > Mbh^{3/2}$:

$$\sum_0^t \left[Q_{cp} - Mb \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right)^{3/2} \right] \Delta t = \sum_0^h \Omega_h \Delta h. \quad (51)$$

Вычисление хода уровней в водохранилище при разных значениях b производится по следующей форме (табл. 25).

Таблица 25

Дни от начала регулирования	Δt сутки	Q м ³ /сек	Q_{cp} м ³ /сек	86400 $Q \Delta t$ млн. м ³	$b = 150$					
					h м	Δh м	$q = Mbh^{3/2}$ м ³ /сек	q_{cp} м ³ /сек	86400 $q_{cp} \Delta t$ млн. м ³	$\Omega \Delta h$ млн. м ³
0		500			0		0			
4	4	900	700	242	0,71	0,71	180	90	31,0	213
8	4	1700	1300	449	1,57	0,86	588	384	132,0	317

Имея из табл. 25 для разных b значения h_{max} , строят зависимость между h_{max} и b и по этой зависимости определяют такое значение

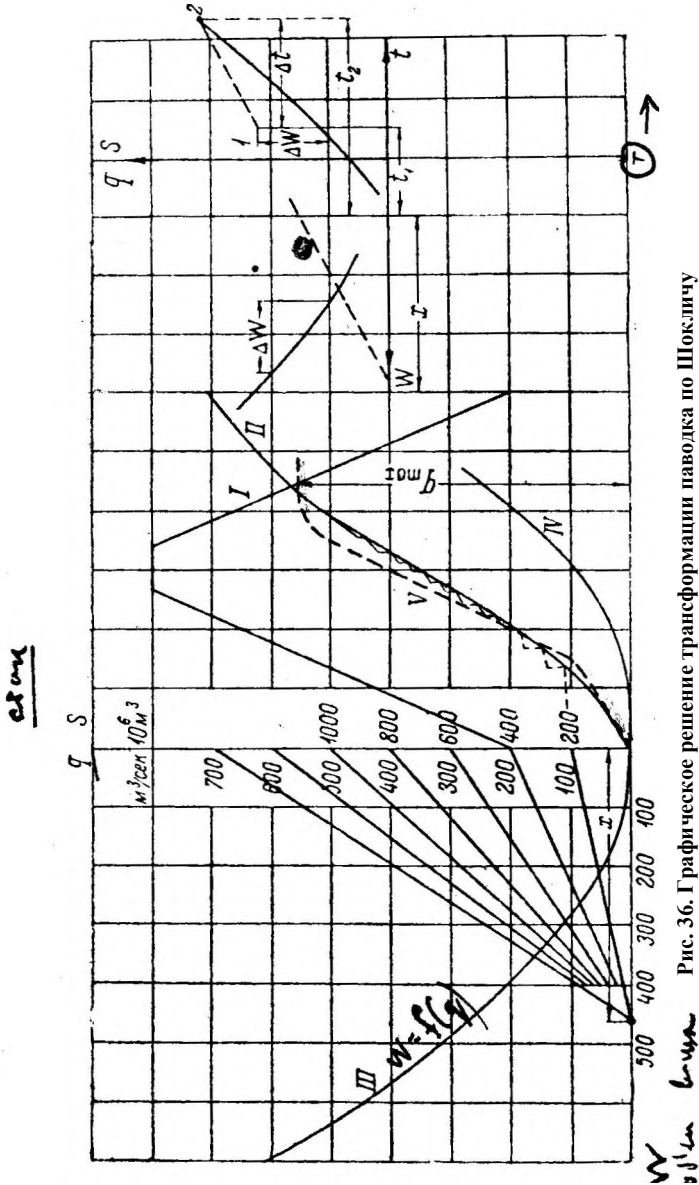


Рис. 36. Графическое решение трансформации паводка по Шокличу

при котором h не превзошло бы принятой по водохозяйственному проектированию величины.

Не менее точно и более наглядно может быть применено графическое решение, предложенное Шокличем.¹

¹ Ш о к л и ч, Графическая гидравлика, 1927.

Сообразно уравнению (24) можно написать:

$$\Delta W = S_Q - S_q = Q \Delta t - q \Delta t = \Delta S_Q - \Delta S_q. \quad (52)$$

Для графического решения на оси абсцисс вправо от начала координат (рис. 36) откладывают время T , влево — объемы водохранилища W в миллионах куб. метров, по оси ординат — расходы q в $m^3/сек$ и объемы суммарного стока S в миллионах куб. метров. В осях q и T строится график расходов анализируемого паводка (кривая I), в осях S и T — интегральная кривая паводка (кривая II). В осях q и W строится кривая объемов водохранилища (кривая III). Построение этой кривой производится следующим образом: для принятой проектом плотины с известной отметкой порога вычисляют $q = f(H)$ и, пользуясь кривой $W = f_1(H)$ (рис. 2), находят зависимость $W = f(q)$, которая и наносится на рисунок (кривая III). В левом же квадрате рисунка строится — лучевой масштаб расходов. Начальный расход через плотину считается известным. При положении уровня воды на отметке гребня плотины $q = 0$. При возвышении этой отметки над гребнем плотины на величину H расход этот находится из функции $q = f(H)$.

Имея подготовленный так рисунок приступают к графическому расчету, который основан на следующем (рис. 36). Пусть на какой-либо момент времени t известен расход через плотину q_1 . Этому расходу по кривой $W = f(q)$ отвечает объем водохранилища W_1 . Задаваясь произвольным расходом $q_2 > q_1$ (интервалы должны быть достаточно малы), определяют соответственно этому расходу объем W_2 и, следовательно, $q \Delta t = W_2 - W_1$ т. е. то приращение объема водохранилища, которое будет иметь место в течение периода времени Δt (пока неизвестного) при нарастании расхода от q_1 до q_2 . Откладывают вверх от точки интегральной кривой притока объем ΔW , отвечающий моменту времени t . От полученной точки 1 проводят до пересечения с интегральной кривой линию 1-2, параллельную лучу масштаба расходов, отвечающему расходу $q_{cp} = \frac{q_1 + q_2}{2}$. Абсцисса точки пересечения (2) определит момент времени t_2 , до которого через плотину будет протекать средний расход $\frac{q_1 + q_2}{2}$.

Действительно, по ходу самого построения мы имеем:

$$\sum_{t_1}^{t_2} Q \Delta t = \Delta W + \sum_{t_1}^{t_2} q \Delta t,$$

или, так как $t_2 - t_1 = \Delta t$,

$$Q \Delta t - q \Delta t = \Delta W,$$

т. е. равенство (52).

Продельвая такое построение от начала периода $t = 0$, можно построить график изменения расходов через плотину (кривая IV)

и таким образом определить значение q_{\max} . Пользуясь значениями q , легко построить интегральную кривую стока (кривая *IV*).

Длина x — расстояние полюса лучевого масштаба расходов — зависит от масштаба времени и соотношения масштабов расходов q и объемов стока S . Действительно, если масштаб расходов будет: 1 *см* — m [$m^3/сек$], масштаб стока: 1 *см* — n [млн. m^3] и масштаб времени: 1 *см* — p дней, то

$$x = \frac{n}{86400 pm}.$$

IV. СУТОЧНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ.

§ 20. Основные положения суточного регулирования.

Мощность, необходимая потребителю, определяется графиком нагрузки. Анализ этих графиков показывает, что обычно в течение суток мощность не остается постоянной и меняется от некоторой наименьшей величины (минимум) до своего наибольшего значения

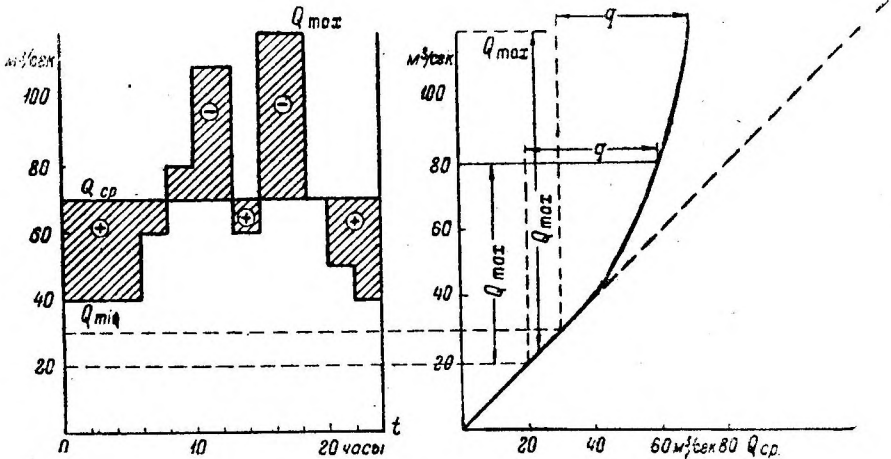


Рис. 37. Суточный график потребления воды.

(максимум). Очевидно, что с изменением мощности должен изменяться и расход воды. В предварительных подсчетах, как это указывалось выше, расход воды Q для обеспечения мощности N киловатт может быть определен по выражению:

$$Q = \frac{N}{8H} \text{ [м}^3\text{/сек]},$$

где H —среднесуточный напор в метрах.

На рис. 37 показан график изменения расходов согласно изменению мощности в течение суток. Так как расход воды в водотоке q в течение суток остается постоянным, то очевидно, что гидростанция без каких-либо специальных мероприятий могла бы удовлетворить

потребителей только в том случае, если $q \geq Q_{\max} = \frac{N_{\max}}{8H}$. В остальные

часы суток, когда $q < Q_{\max}$ вода будет сливаться неиспользованной. При расходах $q < Q_{\max}$ казалось бы, что требования водопользователей удовлетворены быть не могут. Однако это не так. Действительно, если по графику почасовых расходов (график нагрузки) определить среднесуточный расход Q_{cp} (рис. 37а), то увидим, что в течение части суток воду можно было бы резервировать для того, чтобы ее полезно отработать в остальную часть суток, когда потребный расход больше среднего.

Таким образом удовлетворение суточного графика нагрузки возможно путем перераспределения среднесуточного расхода сообразно графику нагрузки, причем суточный баланс стока не нарушается. Такое перераспределение суточного стока называется суточным регулированием.

§ 21. Определение необходимой емкости водохранилища для суточного регулирования.

Суточный сток, необходимый для выполнения заданного графика, определится из выражения:

$$S_{\text{сут}} = 3600 \int_0^{24} Q dt = 3600 \sum_0^{24} Q \Delta t, \quad (53)$$

где

Q — расход, необходимый для обеспечения мощности N ;
 Δt — число часов, в течение которого мощность N остается постоянной.

Очевидно, заданный суточный график нагрузки может быть выполнен только при условии, если

$$3600 \times 24 \times q = S_{\text{сут}} = 3600 \sum_0^{24} Q \Delta t$$

или

$$q = \frac{1}{24} \sum_0^{24} Q \Delta t = Q_{cp}, \quad (54)$$

где

q — расход воды в реке в $m^3/сек$;
 Q_{cp} — среднесуточный расход по заданному графику нагрузки в $m^3/сек$.

Если $q > Q_{cp}$, то часть воды остается неиспользованной, при $q < Q_{cp}$ может быть удовлетворена только часть графика.

Для выяснения, какая часть графика при $q < Q_{cp}$ может быть покрыта водотоком, строится кривая $Q'_{cp} = f(Q'_{\max})$, начиная от основания графика. При построении исходят из равенства $Q'_{cp} =$

$$= \frac{1}{24} \sum_0^{24} Q \Delta t, \quad \text{задаваясь разными значениями } Q \text{ (рис. 37б). Имея такой}$$

график, можно по наличному расходу водотока q определить, какая часть нагрузки может быть покрыта гидростанцией. Метод определения ясен из рис. 37б.

Установив график, который должен быть выполнен гидростанцией, можно легко подсчитать необходимую для этого емкость водохранилища:

$$W = 3600 \sum_0^t (Q - q) \Delta t, \quad (55)$$

где

Q — расход воды согласно графику нагрузки, постоянный в течение периода времени Δt часов;

t — период времени, в течение которого $Q > q$.

Так как при одном и том же бытовом расходе гидростанция может обеспечить различные Q_{\max} (разные части графика нагрузки), то соответственно емкости водохранилища должны быть различны. Подсчеты емкости для различных комбинаций q и Q_{\max} удобно производить по следующей форме (табл. 26).

Таблица 26

$q = 10 \text{ м}^3/\text{сек}$		$q = 20 \text{ м}^3/\text{сек}$		$q = 30 \text{ м}^3/\text{сек}$		$q = 50 \text{ м}^3/\text{сек}$	
Q_{\max} $\text{м}^3/\text{сек}$	W 10^5 м^3	Q_{\max} $\text{м}^3/\text{сек}$	W 10^5 м^3	Q_{\max} $\text{м}^3/\text{сек}$	W 10^5 м^3	Q_{\max} $\text{м}^3/\text{сек}$	W 10^5 м^3
41,5	6,3	56,5	10,20	81	11,70	100	11,75
24,0	4,5	40	6,68	50	6,65	70	5,8
16,2	3,12	27,5	3,65	37,5	3,78	55	2,52
10,0	0	20	0	30	0	—	—

Данные табл. 26 могут быть представлены графически (рис. 38).

Так как суточным водохранилищем обычно является верхний бьеф гидроустановки (в деривационных схемах — канал), то необходимая емкость для регулирования может быть получена только путем сработки верхнего бьефа. Условия забора воды, с одной стороны, и требования иных водопользователей (например, обеспечения минимума судходных глубин, ограничения минимума горизонта воды водоснабжением и др.), с другой, ставят определенный предел понижению уровня воды у гидростанции.

В низконапорных установках возможное понижение горизонта воды верхнего бьефа лимитируется также наименьшим допустимым для работы турбин напором.

Все перечисленные условия ограничивают полезную емкость верхнего бьефа для суточного регулирования, а следовательно и самое регулирование.

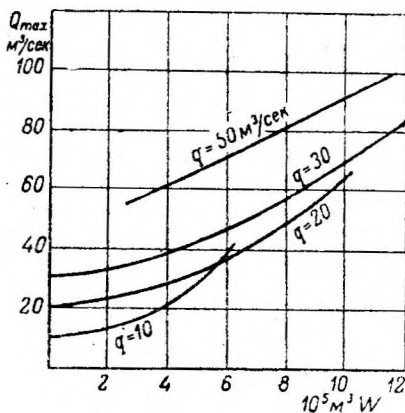


Рис. 38. График зависимости.

§ 22. Расчет продольного профиля воды в бьефе при суточном регулировании.

При суточном регулировании дополнительный расход $Q - q$ (как и вообще при всяком регулировании) заимствуется из водохранилища на всем протяжении его сработки, и следовательно, движущийся по водотоку расход — переменный, причем распределение по длине будет зависеть от фазы регулирования.

При сработке бьефа распределение расходов будет изменяться по какому-то закону от величины регулируемого расхода Q у заборных сооружений до величины бытового расхода Q_0 у границы распространения волн возмущения.

Имея ограничительные данные о наиминиме горизонте воды у плотины по условиям работы турбин и пределы наименьших глубин, устанавливают предварительную величину полезной емкости суточного водохранилища. Емкость эта для навигационного и зимнего периодов может быть и различной. По выбранной емкости водохранилища намечают график регулируемых суточных расходов, пользуясь для этого соответствующим графическим материалом (рис. 26 и 27), и приступают к расчету свободной поверхности верхнего бьефа при суточном регулировании.

Методами расчета колебаний уровня воды в длинных бьефах при суточном регулировании у нас в СССР занимались главным образом проф. И. В. Егiazаров (теоретически и экспериментально) и инж. Н. М. Вернадский (теоретически).

Проф. И. В. Егiazаров¹ весьма подробно изложил общую теорию и эксперименты распространения возмущений в открытых руслах, а также применявшиеся методы определения колебаний верхнего бьефа при суточном регулировании. В результате своей работы проф. И. В. Егiazаров в 1924 г. опубликовал метод, который позволял определять понижение горизонта воды у плотины при суточном регулировании. В предложенном методе сделано предположение, что при регулировании кривые свободной поверхности суть кривые подпора или спада и что явление неустановившегося движения сказывается в непрерывной смене этих кривых.

Таким образом объем израсходованной воды за период регулирования должен быть равен объему, заключенному между первоначальной кривой поверхностью и поверхностью по рассматриваемый момент времени.

Изложенное показывает, что кривая подпора (или спада) на данный момент времени определяется объемом воды, необходимым для регулирования в течение промежутков времени t , и расстоянием $L = ta$, на которое за время t распространилась волна возмущения со скоростью распространения a [м/сек].

Для упрощения расчетов автор метода рекомендует строить вспомогательную номограмму. Для этого необходимо задаться несколькими отметками на гребне плотины, построить серию кривых подпора для разных расходов до пересечения с начальным уровнем и вычислить

¹ И. В. Е г и а з а р о в, Методы определения колебаний уровня воды в длинных бьефах при регулировании, "Известия Научно-мелиорационного института", вып. 7, 1924. Его же, Гидроэлектрические станции, т. 1, 1933.

заключенные между ними и первоначальной кривой свободной поверхности воды объемы. Таким образом можно построить график зависимости $V = f_1(h)$ и $L = f_2(h)$ и подобрать фиктивный расход и отметку на гребне плотины, при которых были бы удовлетворены известные величины V и L .

С 1925 г. проф. И. В. Егизаровым ведутся в гидроэлектрической лаборатории НИИГ эксперименты над отрицательной волной возмущения в прямоугольном лотке длиной 30 м.¹ На основании этих экспериментов проф. И. В. Егизаров предложил новый метод суточного регулирования, сущность которого заключается в следующем: перестроив суточный график нагрузки на суточный график расходов воды (см. § 20), определяют для каждого регулируемого расхода Q (большего, чем бытовой расход q) потребные объемы попусков.

Эксперименты позволили сделать вывод, что при заданном секундном дополнительном расходе ($Q - q$) и известном объеме (V) воды для дополнительного питания за определенный промежуток времени t очертание волны в тех случаях, когда излив не очень большой, определяется кривой подпора, отвечающей расходу воды Q и кривой очертания лба волны, построенной от точки, до которой за период t распространилось возмущение.

Скорость a распространения положительной волны возмущения определяется по формуле:

$$a = v_0 \pm \sqrt{gH} \quad (56)$$

и при значительной высоте волны возмущения

$$a = v_0 \pm \left(\sqrt{gH} + \frac{3h}{4H} \right), \quad (57)$$

где

v_0 — скорость течения воды при установившемся режиме;

H — глубина воды;

h — высота волны.

Для отрицательной волны возмущения скорость a распространения определяется формулой:

$$a = v_0 \pm [3\sqrt{g(H_0 - z)} - 2\sqrt{gH_0}]. \quad (58)$$

Очертание лба положительной волны принимается вертикальным, а для отрицательной находится из уравнения:

$$L_x = t [3\sqrt{g(H_0 - z)} - 2\sqrt{gH_0}], \quad (59)$$

где

L_x — расстояние от плотины;

t — время регулирования;

H_0 — глубина воды;

z — понижение бьефа.

Объем воды, заимствуемый из бьефа при суточном регулировании, заключается между первоначальным и конечным уровнями воды. Первый определяется кривой подпора при установившемся движении (расход Q_0), второй ограничен кривой лба волны (по Сен-Венану), которая пересекает первоначальный уровень в расстоянии L от плотины,

¹ "Известия Научно-мелиорационного института" вып. XXIII, 1931: Гидроэлектрические силовые установки, ч. 1.

равном пути пробега волны возмущения за период времени регулирования, и кривой подпора, соответствующей расходу регулирования.

В 1936 и 1937 гг. проф. И. В. Егиазаров разработал и опубликовал свой последний более совершенный метод расчета неустановившегося волнового движения, а также и осветил вопрос об отражении несомого волной расхода.

Проф. И. В. Егиазаров вводит понятие о волновой границе, представляющее геометрическое место точек пересечения лба и тела волны, по мере продвижения последней. Линия тела волны относится к зоне медленно изменяющегося неустановившегося движения и потому, для ее определения, могут быть применены уравнения установившегося движения. Очертание лба волны определяются согласно изложенному выше. По мере продвижения волны высота ее уменьшается, а следовательно, уменьшается и несомый волной расход воды. Остальная часть расхода, необеспеченная высотой волны, расходуется на изменение тела волны, свободная поверхность которой должна удовлетворять условию равновесия.

Проф. П. В. Егиазаров для определения дополнительного расхода, несомого водной, дает следующие уравнения:

$$\Delta Q = \left[2bH \sqrt{gH} \left(1 \pm \frac{z}{H} \right) \left(1 - \sqrt{1 \pm \frac{z}{H}} \right) \pm bzv_0 \right] \quad (59a)$$

или с несколько меньшей точностью

$$\Delta Q = bz \sqrt{gH} \left(1 \pm \frac{3}{4} \frac{z}{H} \right) \pm bzv_0, \quad (59e)$$

где b — ширина зеркала водотока, которые и дают связь между величинами ΔQ , z и H для того створа, в котором в данный момент времени находится лоб волны.

Для определения всего очертания лба водны, а следовательно и для определения высоты лба водны, необходимо определить время пробега волной расчетного участка, что легко выполнимо на основании формулы

$$t = \frac{L}{a \pm c}, \quad (a)$$

где L — длина участка,

a — скорость распространения волны возмущения.

По известному времени t может быть составлено условие неразрывности

$$Qt = \frac{h_x b + h_0 b_0}{1} L, \quad (б)$$

где h_x — высота волны в сечении, к которому волна подошла к концу времени,

h_0 — высота волны в окончательном сечении также в конце периода времени,

b — ширина зеркала в соответствующих сечениях.

Для случая пренебрежения трением проф. И. В. Егиазаров предлагает формулу

$$Qt = \frac{h_x b + (h_x + iL) b_0}{2} L, \quad (в)$$

где i — уклон первоначальной свободной поверхности.

При достижении волной, высота которой не затухает, закрытого конца бьефа или открытого водоема с большой поверхностью возникает явление, известное под названием отражения.

При достижении волной закрытого конца бьефа отражается полностью весь расход, несомый волной, при достижении же положительной волной открытого водоема отражение заключается в том, что возникает отрицательная волна, по высоте равная положительной (пограничное условие), в результате чего начинается излив воды из водотока в водоем. При отражении отрицательной волны от водоема возникает положительная волна, следствием которой является усиление питания водотока из водоема.

Расчет отраженных волн производится по приведенным выше формулам. При расчете отраженных волн от открытого водоема необходимо учитывать изменение скоростного напора, влияющего на высоту отраженной волны.

Отражение возникает только в том случае, если высота волны до достижения открытого водоема или закрытого конца не затухает.

Если же высота волны затухла, то неустановившееся движение на протяжении всего бьефа можно рассматривать как медленно изменяющееся, и расчет вести по методу инж. Н. М. Вернадского или какому-либо иному.

При расчете наивысшего повышения горизонта воды в сечении водозаборных сооружений следует обращать внимание на то, что повышение горизонта воды продолжается до тех пор, пока отраженная волна не возвратится к начальному сечению, в котором произошло возмущение.

Пользуясь методом построения, предложенным проф. И. В. Егизаровым, представляется возможным определить продольный профиль свободной поверхности водотока на каждый выбранный момент времени.

Наличие льда на водотоке не вносит принципиальных изменений в метод расчета. Ледяной покров на скорость распространения волны возмущения не влияет. Влияние его сказывается благодаря дополнительному трению на профиле свободной поверхности тела волны. В результате этого влияния высота волны уменьшается, но зато повышение горизонта воды в створе водозаборных (или водосбросных) сооружений происходит более интенсивно.

Большие подробности по этому методу можно найти в I и III частях курса гидроэлектрических установок проф. И. В. Егизарова, а также в Известиях НИИГ, т. XIX, 1936 г. и тт. XX и XXI, 1937 г. и журнале "Гидротехническое строительство", 1937 г., № 6 и 7.

При выводе предложенных зависимостей по своему методу инж. Н. М. Вернадский¹ исходит из основных уравнений движения потока, а именно условия равновесия и условия неразрывности. Первое, при неустановившемся движении, приводит к равенству:

$$y = \frac{\Delta}{L} = \frac{Q^2}{C^2 R F^2} + \frac{1}{gF} \cdot \frac{dQ}{dt}; \quad (60)$$

¹ Инж. Н. М. Вернадский, Речная гидравлика. Его же, Теория и расчет речного паводка с применением их к суточному регулированию р. Волхова. Материалы Волховстроя, вып. XVII.

второе дает такие равенство:

$$Q_2 - Q_1 = w \frac{\Delta h}{\Delta t}. \quad (61)$$

В этих равенствах:

Q_1 — расход воды в начальном сечении рассматриваемого участка водотока;

Q_2 — то же в конечном сечении;

Q — средний расход на участке;

F — площадь живого сечения;

L — длина участка;

R — гидравлический радиус;

C — коэффициент формулы Шези;

u — уклон воды;

w — площадь зеркала участка;

Δh — изменение горизонта воды на участке в течение периода времени Δt ;

Δ — полное падение на участке.

Называя буквою q часовое приращение расхода (вследствие суточного регулирования), можно равенству (60) придать вид:

$$\Delta = \frac{LQ^2}{C^2RF^2} + \frac{Lq}{3600gF} = \alpha Q^2 + \beta q, \quad (62)$$

где

$$\alpha = \frac{L}{C^2RF^2} \text{ и } \beta = \frac{L}{3600gF}.$$

Так как в дальнейшем интересно будет устанавливать избыточное падение, определяющее сработку бьефа, то величина итогов избыточного падения δ может быть подсчитана из уравнения:

$$\delta = \Delta - \Delta_0 = \alpha Q^2 + \beta q - \alpha Q_0^2 = \alpha (Q^2 - Q_0^2) + \beta q, \quad (63)$$

где Δ_0 — падение на участке при расходе Q_0 .

Для каждого рассматриваемого участка отдельно подсчитываются $\alpha (Q^2 - Q_0^2)$ и βq и представляются графически (рис. 39).

На основании построенных графиков для каждого отдельного случая легко может быть вычислено δ .

Уравнение неразрывности для периода времени l будет иметь следующий вид:

$$\sum_0^t (Q_2 - Q_1) \Delta t = \sum_0^h w \Delta h = wh$$

или

$$\sum_0^t (Q_2 - Q_0) \Delta t - \sum_0^t (Q_1 - Q_0) \Delta t = wh, \quad (64)$$

где

Q_0 — бытовой расход реки;

Q_1 — расход воды при регулировании в начале участка;

Q_2 — то же в конце участка.

Выражение $\sum_0^t (Q_2 - Q_0) \Delta t$ представляет собой сток, избыточный над бытовым при суточном регулировании. Величина эта по графику

потребления воды (график нагрузки — рис. 37, а) для места выбора воды может быть легко подсчитана и графически построена (рис. 40).

Таким образом равенство (64) показывает, что разность избыточных стоков в конце и начале участка равняется объему сработанной призмы воды на рассматриваемом участке.

Если водоток общей длиной l разбить на отдельные участки № 1- № 4 таким образом, чтобы площади зеркала воды w для всех

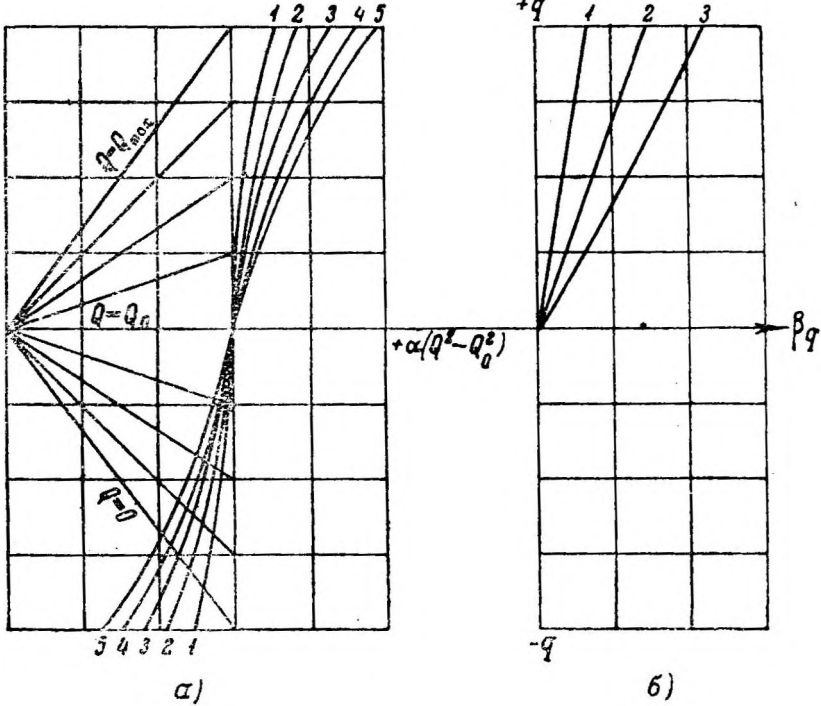


Рис. 39. График для определения дополнительного падения.

участков были равны (рис. 41), то на какой-либо момент времени t от начала регулирования можно написать, что сработанный за период времени t объем водохранилища

$$W = \sum u = \sum wh = w \sum h, \tag{65}$$

где

- u — сработанная призма на каждом из участков;
- w — площадь зеркала каждого участка;
- h — высота сработанной призмы.

Из рис. 41 легко установить, что дополнительное падение на каждом участке $\delta_i = h_i - h_{i+1}$, следовательно,

$$\delta_i = \frac{u_i}{w} - \frac{u_{i+1}}{w} = h_i - h_{i+1}, \tag{66}$$

где u_i — заимствованный объем воды на участке в течение периода времени t .

Пользуясь сказанным, представляется возможным произвести графический расчет свободной поверхности воды и распределение расходов

по длине водотока для суточного регулирования.

При расчетах учитывается, что регулируемый расход по длине водотока устанавливается не мгновенно, а распространяется со скоростью

$$a = v_0 \pm \sqrt{gH}, \quad (56)$$

где v_0 — скорость течения при установившемся режиме на участке;

H — средняя глубина воды на участке.

Процесс проектировки складывается из следующих моментов:¹

Устанавливается график регулируемых расходов (рис. 37) и вычисляется на отдельные моменты необходимое дополнительное питание, заимствуемое из бьефа. Расчет ведется по формуле, представленной в табл. 27.

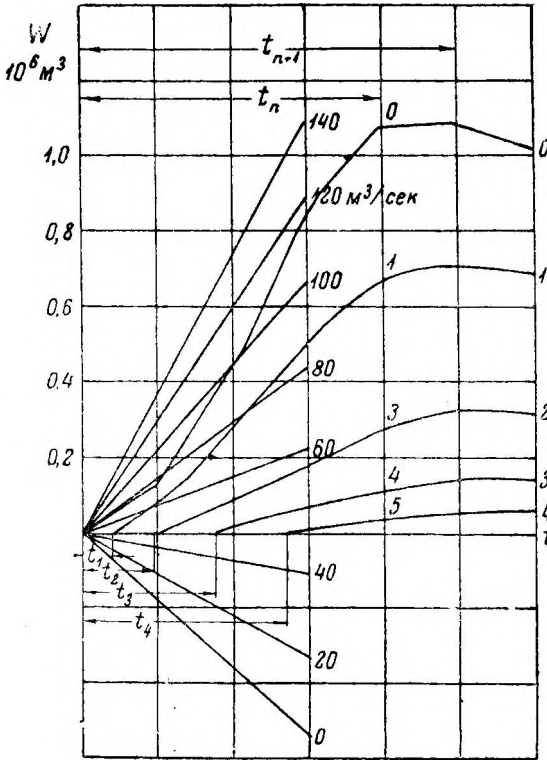


Рис. 40. К расчету суточного регулирования.

Таблица 27

Время от начала регулирования	Интервал времени Δt	Регулируемый расход Q_c	Бытовой расход Q_0	Избыточный расход $Q_c - Q_0$	Средний избыточный расход $Q_{ср}$	Расходуемый объем за интервал времени Δt $V = 3600 \Delta t Q_{ср}$	Израсходованный объем с начала регулирования
часы	часы	м ³ /сек	м ³ /сек	м ³ /сек	м ³ /сек	м ³	10 ⁶ м ³
0		290	290	0			0
2	2	400	290	110	55	396 000	0,396
4	2	600	290	310	210	510 000	0,906

¹ Г. К. Лоттер, Описание хода расчета суточного регулирования, Материалы Волховстроя, вып. XVII.

Результаты подсчета наносят на чертеже (линия OO). По оси абсцисс откладывают в выбранном масштабе время, но оси ординат — объемы (рис. 40).

На чертеже получается интегральная кривая заимствуемого стока; для облегчения чтения, а также и для дальнейшего проектирования наносится лучевой масштаб расходов. Пользуясь лучевым масштабом, можно на основании равенства (63) строить для отдельных участков (1, 2, 3 и т. д.) график избыточных падений (рис. 39).

Следующий процесс расчета заключается в вычислении скорости распространения волны возмущения. Вычисление выполняется в табличной форме (табл. 28). Полученные моменты времени наносятся на рисунок (см. рис. 40), причем нанесенные точки показывают время когда регулируемый расход достигает начала участков (1, 2, 3 и т. д.)

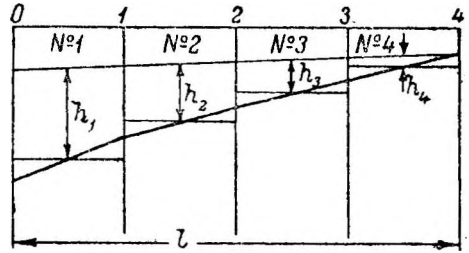


Рис. 41. График разбивки бьефа на участки.

Таблица 28

№ профилей (гра- ниц участков)	Расстояние про- филей от водоза- борного соору- жения	Длина участков L	Площадь живого сечения в профи- лях F	Средняя пло- щадь сечения $F_{ср}$	Средняя глубина H	Скорость распро- странения расхо- да α	Время пробега расхода на уча- стке	Полное время пробега расхода до профиля t
	м							
0	0	6000	3600	2740	10,0	9,9	10,1	0
1	6000	6000	1880	1530	4,9	6,94	14,4	0,17
2	12000		1180					0,41

Проведя все построения через определенные интервалы времени, получим ординаты (например $0-5$, рис. 40), которые показывают полный заимствованный за период времени объем воды из водохранилища или согласно равенству (65) суммируют глубину сработки всех участков.

Для определения глубины сработки на каждом отдельном участке необходимо воспользоваться зависимостью (66), по которой

$$h_{i+1} = h_i + \delta_i$$

Задаваясь для первого участка произвольной величиной h_1 равной $0-1$, откладываем эту величину вниз от суммарной кривой избыточного стока у заборных сооружений (рис. 40, кривая 0). Полученная

точка должна принадлежать суммарной кривой избыточного стока в первом профиле (кривая 1); соединяя ее с аналогичной точкой предшествующего момента, получим луч, по которому можно определить величину расхода, а следовательно, и избыточное падение для второго участка (по графику рис. 39, а). Имея избыточное падение, определяют h_2 для второго участка и, откладывая его на рисунке от точки 1 вниз, получают точку 2 и т. д. Полученная таким образом сумма всех h должна быть в точности равна ординате 0-5. Это обычно достигается не сразу, а последовательным приближением. Установив для ряда моментов глубины сработки отдельных участков и расходы, можно построить продольные профили поверхности водотока и по ним установить, насколько удовлетворительны условия, поставленные другими водопользователями.

Большие подробности по описанному методу, а также и другим предложенным инж. Н. М. Бернадским способам можно найти в труде последнего: "Речная гидравлика, ее теория и методология".

ЛИТЕРАТУРА

1. Г р ю н е в а л ь д . Экономические расчеты гидравлических силовых установок.
2. Е г и з а р о в И. В. Гидроэлектрические установки, ч. I, 1934 г. и ч. III, 1937 г. Известия Н. И. И. Г. №№ XII, XVII, XIX, XX и XXI; Гидротехнич. строительство, 1937 г., 6 и 7.
3. К р и ц к и й С. Н. и М е н к е л ь М. Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятности. 1932 г.
4. К р и ц к и й С. Н. и М е н к е л ь М. Ф. Регулирование речного стока. Гидротехнич. Строит. 1935 г. №№ 3, 4.
5. Л о т т е р Г. К. Изыскания для гидросиловых установок. 1934 г.
6. Л о т т е р Г. К. Водохозяйственные расчеты для гидростанций (литографир.) 1935 г.
7. L u d i n A. Die Wasserkrafte, ч. I. 1923 г.
8. Л ю д и н А. Гидроэлектростроительство Скандинавии. 1931 г.
9. Л я п и ч е в П. А. Регулирование стока на максимальную отдачу. Гидротехн. Строит. 1935 г. № 7.
10. М о р о з о в А. А. Утилизация водной энергии (литографиров.) 1934 г.
11. М о с т к о в М. А. Основы и расчет водно-силового регулирования.
12. Н а т а н с о н А. Гидросиловые расчеты. Гидротехнич. Строительство. 1931 г. № 7.
13. О г и е в с к и й А. В. Гидрология суши. 1936 г.
14. П о т а п о в М. В. Регулирование стока. 1933 г.
15. С о к о л о в с к и й Д. Л. Применение кривых вероятностей к расчетам годового и максимального стока. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, вып. XXIII, 1934 г.
16. Ш о к л и ч А. Графическая гидравлика. 1927 г.
17. Б е р н а д с к и й Н. М. Речная гидравлика, ее теория и методология, т. I, 1933 г.
18. К о ч е р и н Д. И. Нормы наибольших расходов снеговых паводков в европейской части СССР. Гидротехн. Сборы. I, 1927 г.
19. К о ч е р и н Д. И. Определение отверстий искусственных сооружений с учетом хода паводочного притока и наполнение пруда. Труды М. И. И. Т. вып. VI, 1927 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
I. Введение	
§ 1. Сущность задачи при проектировании водного хозяйства ...	3
§ 2. Исходные данные при водохозяйственном проектировании ...	7
§ 3. Гидроэнергетические характеристики, полученные в результате водохозяйственного проектирования.....	9
II. Водохозяйственные расчеты при отсутствии регулирования стока	
§ 4. Методика расчета.....	11
§ 5. Выбор расчетных лет.....	12
§ 6. Некоторые указания для определения величин расходов и стока при недостатке гидрологических данных.....	12
§ 7. Общий ход проектирования.....	20
III. Многолетнее, годовое и сезонное регулирование стока	
§ 8. Основные положения и общие данные о методике расчета ...	25
§ 9. Влияние расположения водохранилища на методику расчетов .	28
§ 10. Метод интегральных кривых.....	31
§ 11. Применение метода интегральных кривых при недостатке гидрометрических данных.....	42
§ 12. Ход проектирования в зависимости от схемы регулирования .	42
§ 13. Расчет водохранилища при зависимости регулируемого расхода от наполнения по методу инж. Н. В. Мастицкого.....	47
§ 14. Основные задачи, решаемые помощью интегральных кривых .	49
§ 15. Значение прогноза режима водотока при регулировании	64
§ 16. Учет вредных потерь в расчетах по регулированию.....	55
§ 17. Решение отдельных задач с помощью специальных приемов и применения теории вероятности	66
§ 18. Расчетные характеристики зарегулированного режима	68
§ 19. Трансформация паводочного стока.....	69
IV. Суточное регулирование	
§ 20. Основные положения суточного регулирования.....	75
§ 21. Определение необходимой емкости водохранилища для суточного регулирования	76
§ 22. Расчет продольного профиля воды в бьефе при суточном регулировании.....	78

Замеченные опечатки

Стран.	Строки	Напечатано	Должно быть
62	7 сверху	секциях	секундах
84	30 „	формуле	форме

Зак. 2464. Г. В. Лоттер.

Цена 1 р. 60 к.

ЭГ-30-5-3.(2)