

Б. О. Егизарян

Приближенный способ нахождения расхода воды при прохождении прямой волны

1. Неустановившееся движение воды и его расчет

Неустановившееся движение воды, называемое также волновым движением, характеризуется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$i_0 - \frac{1}{B} \frac{\partial F}{\partial s} - \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{\alpha}{g} \left(u \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial u}{\partial t} \right),$$
$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

решить которую в общем случае не удастся, почему и все имеющиеся решения являются приближенными.

В настоящее время можно отметить два подхода к решению вопросов неустановившегося волнового движения. Первое направление исходит из принципа получения наибольшей возможной точности, поэтому методы этого направления можно условно называть „точными“ (методы характеристик, мгновенных режимов). Второе направление исходит из требований практики диспетчерской службы гидроэнерго-систем. Методы этого направления неизбежно менее точны, чем методы первого направления, но зато более простые. Их можно называть „упрощенными“ методами. Они получаются упрощением „точных“ методов или же основываются на данных экспериментов.

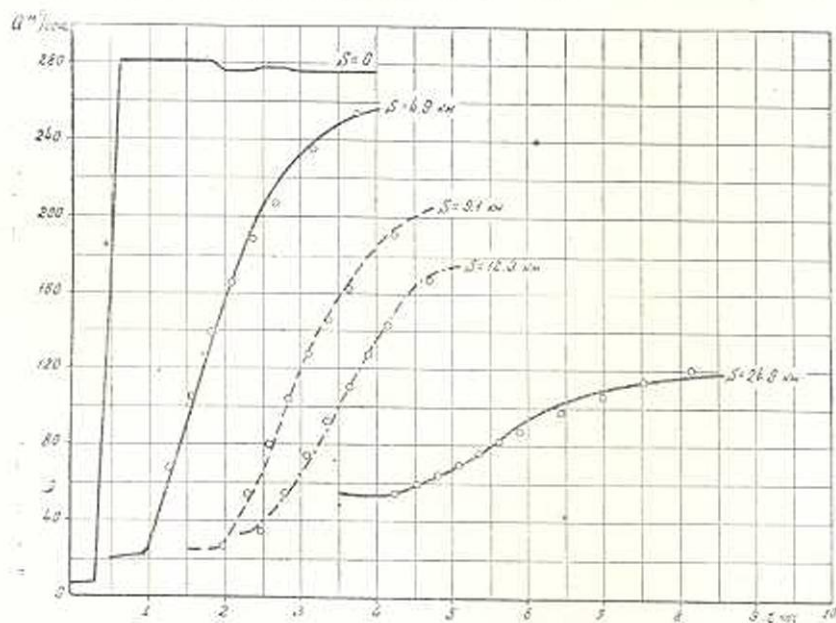
Основной недостаток „точных“ методов заключается в том, что все они сложны и громоздки (хотя и в различной степени). Поэтому они не могут быть применены в процессе эксплуатации гидротехнических сооружений и в особенности при диспетчерском планировании суточного регулирования, когда важное значение имеет быстрое, непосредственное определение расходов в любом створе водотока в любой момент времени, притом без трудоемких расчетов, несложными приемами, так, чтобы эту работу мог бы выполнить рядовой работник в течение нескольких часов.

Анализ приближенных методов расчета волнового движения, приведенный в [9], показал, что для планирования суточного регулирова-

ния можно было бы использовать методы М. В. Потапова [5] и Б. М. Лося [10]. Метод Потапова, дающий хорошие результаты при определении затухания максимального расхода волны попуска, имеющей треугольный гидрограф, не дает требуемой точности при построении кривой изменения расхода во времени в разных створах. Метод Лося удобен для быстрого вычисления расходов воды при неустановившемся движении, но допущения, сделанные при выводе основных расчетных формул, безусловно, делают метод недостаточно точным. Необходимо было разработать метод для непосредственного, с достаточной для практики точностью, вычисления расходов воды при неустановившемся движении. В настоящей статье делается такая попытка для определения расхода при прохождении прямой волны.

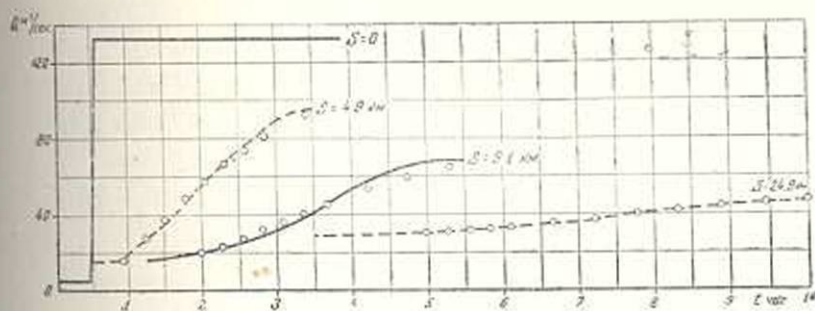
2. Определение расхода воды при прохождении прямой волны

Опыты и натурные наблюдения (фиг. 1—6) показывают, что если в каком-нибудь створе (источнике возмущения) увеличить расход воды на ΔQ_0 , то в нижерасположенных створах увеличение расхода будет происходить с меньшей интенсивностью, медленнее, чем у источника возмущения и тем медленнее, чем дальше расположен рассма-



Фиг. 1.

триваемый створ от источника возмущения. Изменение расхода в каком-нибудь створе начинается в момент добегания T начала волны к данному створу. Изучение опытных данных показывает, что если в источнике возмущения изменение расхода во времени происходит по прямой линии, то в нижерасположенных створах его можно выразить



Фиг. 2.

показательной функцией (как это делает для уровней Браславский [1]) вида:

$$\Delta Q = \Delta Q_0(1 - e^{-\alpha \tau}), \quad (2)$$

$$\tau = t - T,$$

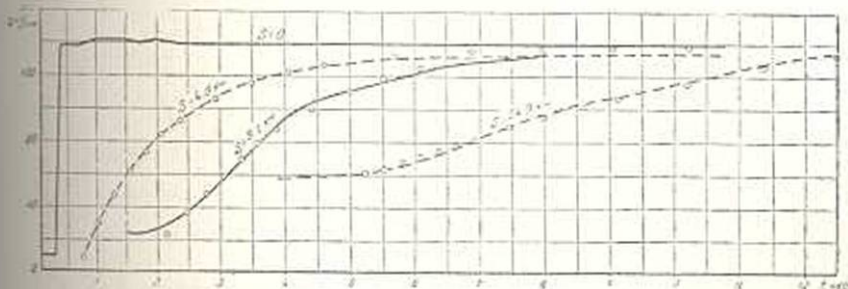
где ΔQ_0 — максимальное увеличение расхода в начальном створе, после чего расход остается постоянным; α — параметр, называемый показателем деформации; t — время; T — время добегания начала волны от источника возмущения до данного створа.

Полный расход, проходящий через данный створ, будет:

$$Q = Q_0 \pm \Delta Q_0(1 - e^{-\alpha \tau}), \quad (3)$$

где знак плюс относится к увеличению расхода (положительная волна), а знак минус — к уменьшению расхода (отрицательная волна).

На фиг. 1—6 приведено несколько сопоставлений опытных кривых изменения расхода с кривыми по (3).



Фиг. 3.

Значение показателя α в каждом случае определено из данного опыта путем попыток. На фиг. 1—4 использованы опыты СКГУ в нижнем свободном бьефе [2], а на фиг. 5 и 6 — опыты ЦНИИЛ в подпертом нижнем бьефе Тихвинской водной системы [3]. Точками показаны результаты расчета, а сплошными линиями — результаты экспериментов. На фиг. 4 рассмотрено многократное изменение расхода в одном створе, причем параметр α для всех односторонних изменений принят одинаковым.

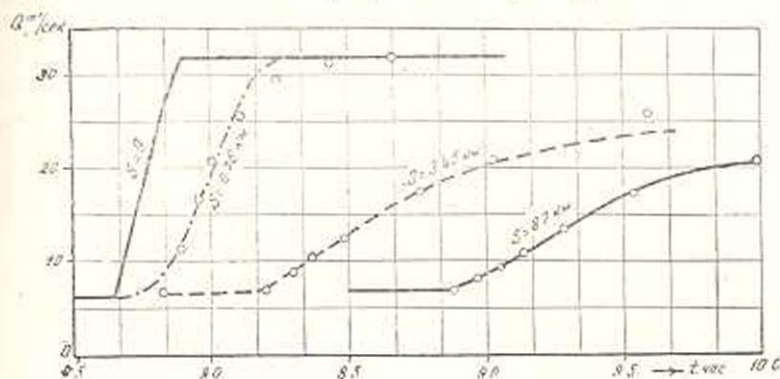


Фиг. 4.

Приведенные сопоставления показывают, что:

- принятый показательный закон практически правильно выражает закон изменения расхода во времени в каждом створе при одностороннем конечном изменении расхода в начальном створе и
- для каждого такого изменения расхода параметр α можно принимать постоянным во времени в данном створе.

Задача заключается в определении параметров α и T .



Фиг. 5.



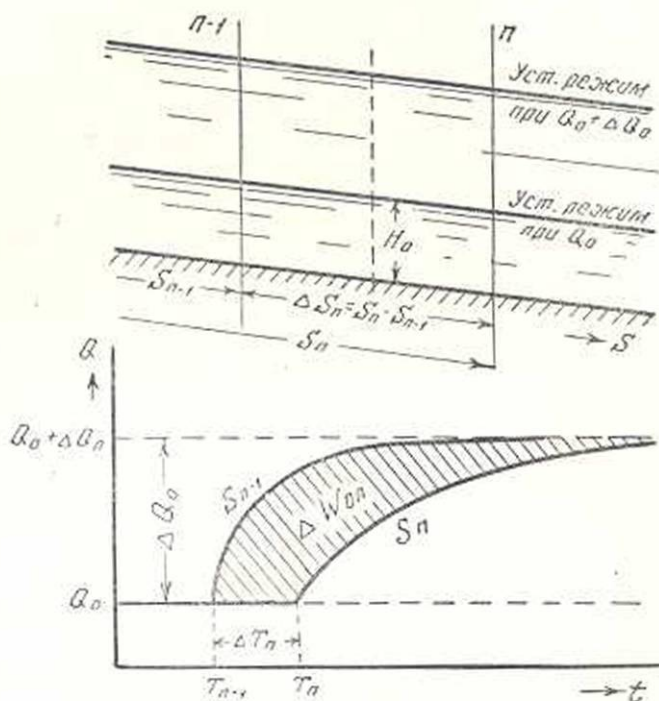
Фиг. 6.

Время добегаания T определяется по расстоянию $s - s_0$ между данным и начальным створами и по скорости распространения начальной точки волны ($z=0$), для которой (см. [9]) в случае реальной жидкости применима формула Лагранжа

$$\omega = \sqrt{g \frac{F}{B}} + u;$$

$$T = \int_{s_0}^s \frac{ds}{\omega}. \quad (4)$$

Для определения параметра α составим уравнение неразрывности потока на участке водотока между сечениями s_{n-1} и s_n (фиг. 7):



Фиг. 7.

$$Q_{n-1}dt + Q_0(s_n - s_{n-1})dt - Q_n dt = dw, \quad (5)$$

где Q_0 — боковая приточность на один н. м. длины; Q_{n-1} и Q_n — расходы воды в створах s_{n-1} и s_n ; dw — приращение объема воды на рассматриваемом участке за промежуток времени dt .

Подставляя значение Q_{n-1} и Q_n по (3), принимая Q_0 постоянным по времени и интегрируя (5) от T_{n-1} до $t > T_n$, получим после простых преобразований:

$$\Delta Q_0(T_n - T_{n-1}) - \frac{\Delta Q_{n-1}}{\alpha_{n-1}} + \frac{\Delta Q_n}{\alpha_n} = w - w_{01}, \quad (6)$$

где w — объем воды в пределах участка.

При $t \rightarrow \infty$, $\Delta Q \rightarrow \Delta Q_0$ и в данном створе устанавливается стационарный режим, соответствующий новому расходу $Q_0 \pm \Delta Q_0$. Тогда в пределе из (6) получим:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_{n-1}}{1 + \alpha_{n-1} \left(\frac{\Delta w_{0n}}{\Delta Q_0} - \Delta T_n \right)} \quad (7)$$

или, если требуется найти α_n непосредственно,

$$\alpha_n = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 \sum_1^n \left(\frac{\Delta w_{0i}}{\Delta Q_0} - \Delta T_i \right)}, \quad (7')$$

где $\Delta w_{0n} = w_{02} - w_{01}$ — приращение объема воды на участке при переходе от одного установившегося режима к другому: $\Delta T_n = T_n - T_{n-1}$ — время пробега данного участка началом волны; α_0 — показатель деформации в начальном створе (источнике возмущения).

Если в начальном створе изменение расхода на ΔQ_0 во времени происходит линейно в течение промежутка времени τ'_0 , то аналогичным образом, применяя условие неразрывности для участка водотока, примыкающего к источнику возмущения, получим:

$$\alpha_1 = \frac{1}{0,5\tau'_0 + \left(\frac{\Delta w_{01}}{\Delta Q_0} - \Delta T_1 \right)} \quad (8)$$

и

$$\alpha_n = \frac{1}{0,5\tau'_0 + \sum_1^n \left(\frac{\Delta w_{0i}}{\Delta Q_0} - \Delta T_i \right)} \quad (8')$$

Если расход в начальном створе меняется внезапно, скачкообразно, то, подставляя в (8') $\tau'_0 = 0$, получим:

$$\alpha_n = \frac{1}{\sum_1^n \left(\frac{\Delta w_{0i}}{\Delta Q_0} - \Delta T_i \right)} \quad (8'')$$

Из (2) видно, что показатель α характеризует степень быстроты перехода от одного установившегося режима к другому. Чем больше α , тем быстрее практически устанавливается новый стационарный режим и, следовательно, тем быстрее происходит наполнение или опорожнение русла. Параметр α характеризует также время добегания расхода до данного створа; чем больше α , тем больше и скорость распространения постоянного расхода и, следовательно, меньше время его добегания.

Отметим, что уменьшение расхода (отрицательную волну) можно рассматривать как увеличение (положительную волну) с обратным знаком, так что выведенные зависимости остаются в силе и для волны отлива.

Остановимся на предположках, принятых при выводе расчетных формул. Предположки следующие:

а). При изменении расхода в начальном створе на конечную величину ΔQ_0 и при дальнейшем его постоянстве, свободная поверхность воды от одного установившегося положения, соответствующего первоначальному расходу Q_0 , переходит к другому установившемуся положению, соответствующему новому расходу $Q_0 \pm \Delta Q_0$.

б). При изменении расхода во времени в начальном створе по линейному закону изменение расхода от Q_0 до $Q_0 \pm \Delta Q_0$ в нижерасположенных створах с достаточной для практики точностью может быть выражено функцией (3).

в). Предпосылки (а) и (б) в равной мере правильны как для свободных (неподпертых), так и для подпертых бьефов.

Установление в бьефе нового стационарного режима, соответствующего расходу $Q_0 \pm \Delta Q_0$, не может вызывать сомнений. Действительно, если предполагать, что такой режим не устанавливается, то и установившегося движения в таком виде, как его вообще представляют, не могло бы существовать, что противоречит действительности.

Постепенный переход от одного установившегося режима к другому следует из анализа результатов многочисленных экспериментов (см., например, [2], [3]). Соответствующие новому установившемуся режиму кривые $Q = Q(s)$ и $H = H(s)$ следует называть конечными условиями; они дополняют известные в гидравлике начальные и граничные условия. Определению конечных условий надо придавать большое значение, так как от их точности в каждом случае зависит точность определения параметра α .

Возможность замены действительного закона изменения расхода во времени в любом створе в свободных и подпертых бьефах показательной функцией (3) доказывают сопоставления расчетного и действительного изменений расхода, некоторые из которых приведены в статье, причем фиг. 1—4 даны для свободного бьефа, а фиг. 5—6— для подпертого. Следует отметить, что в подпертых бьефах положение свободной поверхности при новом расходе $Q_0 \pm \Delta Q_0$ зависит также от условий в створе подпертых сооружений и для определенности конечных условий необходимо знать граничные условия в указанном створе.

Отметим, что полученные формулы правильны для бьефов, которые имеют достаточно большую длину. Это условие необходимо для того, чтобы отраженная от конца бьефа волна не могла бы нарушить принятый закон изменения расхода в каждом створе. Практически достаточно иметь такую длину, чтобы отношение высот прямой и отраженной волн в рассматриваемом створе $\frac{h_{отр}}{h_{пр}}$ было бы меньше заранее заданной величины; такой бьеф называется длинным бьефом [4]. В противном случае формулами можно пользоваться до момента добегания начала отраженной волны до рассматриваемого створа. Условие большой длины отпадает, если принимать, что пропускаемый в конце бьефа расход в каждый момент времени соответствует расходу, перемещаемого волной.

3. Распределение расхода по длине водотока

Имея графики расходов в отдельных створах, легко построить график распределения расхода по длине водотока в любой момент времени $t = \text{const}$ (так называемые мгновенные кривые расходов). Это построение можно вести и без предварительного нахождения графиков $Q = Q(t)$. Действительно, если в уравнении (3), выражающем изменение расхода по времени при $s = \text{const}$, оставить время t постоянным и изменять расстояние s , то можно получить уравнение указанной мгновенной кривой расходов $Q = Q(s)$. В частности, для призматического неподпертого бьефа при быстром изменении расхода в начальном створе это уравнение имеет вид:

$$Q = Q_0 \pm \Delta Q_0 \left(1 - e^{-\frac{p}{s}} \right), \quad (9)$$

где

$$p = \frac{L - s}{\omega \frac{\Delta F_p}{\Delta Q_0} - 1}, \quad (10)$$

$L = \omega t$ — расстояние, на которое распространяется начало волны к моменту t . Как видно из (10), выражением (9) можно пользоваться до тех пор, пока $s \leq L$; до створа же $s > L$ волна еще не распространилась и, следовательно, в нем увеличение расхода не имеет места.

Аналогичным образом можно найти зависимость и для построения кривой $Q = Q(s)$ при медленном изменении расхода в начальном створе.

4. Определение уровней воды

В большинстве случаев практики, кроме изменения расхода воды, важно знать также изменение глубин в водотоке. Полученные выше зависимости дают возможность, без больших дополнительных вычислений, определять также глубины воды при неустановившемся движении. Заменяя (фиг. 7) приращение объема на участке $\Delta w = w - w_0$ величиной $\Delta H B_{cp}(s_n - s_{n-1})$, где ΔH — приращение глубины в створе $\frac{s_{n-1} + s_n}{2}$, а B_{cp} — средняя на высоте ΔH ширина потока в том же створе, из (6) получим:

$$\Delta H = \frac{\Delta Q_0}{\omega B_{cp}} - \frac{1}{B_{cp} \Delta s_n} \left(\frac{\Delta Q_{n-1}}{\alpha_{n-1}} - \frac{\Delta Q_n}{\alpha_n} \right), \quad (11)$$

а полная глубина потока будет

$$H = H_0 + \Delta H.$$

Расходы ΔQ_{n-1} и ΔQ_n в створах s_{n-1} и s_n определяются по (2).

Уравнение (11) решается подбором.

При получении (11) было предположено, что кривая свободной поверхности воды в пределах рассматриваемого участка прямая линия и поэтому необходимо, чтобы в пределах участка элементы потока изменялись достаточно плавно. Это условие удовлетворяется при больших значениях T_n . Если кривую свободной поверхности нельзя заменить прямой линией, то надо водоток разбить на небольшие участки.

В тех случаях, когда известна зависимость $\Omega = \Omega(H)$ между площадью свободной поверхности и глубиной потока в среднем створе, выражение (11) можно записать в следующем виде:

$$\Delta H = \frac{\Delta Q_0}{\Omega_{cp}} (T_n - T_{n-1}) - \frac{1}{\Omega_{cp}} \left(\frac{\Delta Q_{n-1}}{\alpha_{n-1}} - \frac{\Delta Q_n}{\alpha_n} \right), \quad (11')$$

где Ω_{cp} — площадь свободной поверхности в пределах участка при глубине в среднем створе $H_0 + \frac{\Delta H}{2}$.

Очевидно, что выражениями (11) и (11') можно пользоваться при условии $t > T_n$, т. е. после того, как начало волны уже добежало до створа s_n . Если требуется определить уровень в момент $T_{n-1} < t < T_n$ (фиг. 7), то нужно пользоваться условием неразрывности, написанным для участка между створами s_{n-1} и s , в котором находится начало волны в момент t . Место последнего створа определяется по скорости начала волны:

$$s = s_{n-1} + \int_{T_{n-1}}^t \omega dt = s_{n-1} + \omega_{cp}(t - T_{n-1}).$$

Составляя и решая уравнение неразрывности для этого участка, найдем:

$$H' + H_0 + \frac{\Delta Q_0}{\omega B'_{cp}} - \frac{\Delta Q_{n-1}}{\alpha_{n-1} B'_{cp} \Delta s'_n}, \quad (12)$$

или же

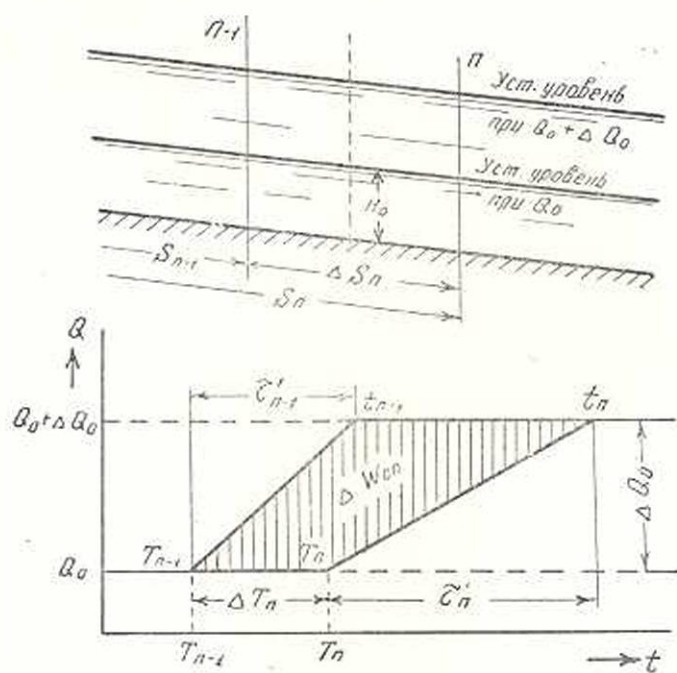
$$H' = H_0 + \frac{\Delta Q_0}{\Omega_{cp}} (t - T_{n-1}) - \frac{\Delta Q_{n-1}}{\alpha_{n-1} \Omega'_{cp}}, \quad (12')$$

где H_0 и H' — глубины потока в среднем створе $\frac{s + s_{n-1}}{2}$ до волны и в момент t ; B'_{cp} и Ω'_{cp} уже относятся к участку $s - s_{n-1}$ и зависят от средней глубины $\frac{H' + H_0}{2}$.

5. Определение расхода прямой волны в предположении линейного изменения расхода воды во времени в любом створе водотока

Определение расхода прямой волны в некоторых случаях можно более упростить, если предполагать, что при прямолинейном измене-

нии расхода в начальном створе в нижерасположенных створах изменение расхода происходит также прямолинейно, но с уменьшенной, под влиянием сил трения, интенсивностью. Чем дальше расположен рассматриваемый створ от источника возмущения, тем меньше интенсивность изменения расхода в этом створе и тем больше время, в течение которого происходит изменение расхода (фиг. 8).



Фиг. 8

В каждом створе уравнение прямой, выражающей закон изменения расхода, можно записать в следующем виде:

$$\Delta Q_n = \frac{\Delta Q_0}{t_n - T_n} (t - T_n) = \frac{\Delta Q_0}{\tau'_n} \tau'_n, \quad (13)$$

где T_n и t_n — моменты добегания начала и конца волны к створу s_n ; $\tau'_n = t_n - T_n$ — продолжительность изменения расхода в том же створе.

Если T_n и τ'_n известны, то уравнение кривой расходов (13) в каждом створе становится вполне определенным. Об определении времени добегания T_n уже было сказано выше. Для нахождения параметра τ'_n применим условие неразрывности к участку водотока, ограниченному створами s_{n-1} и s_n (фиг. 8). Увеличение объема воды на участке за промежуток времени $t_n - T_{n-1}$ должно равняться площади графика расходов $T_{n-1} t_{n-1} t_n T_n$. Из этого равенства получим:

$$\Delta Q_0 (T_n - T_{n-1}) - \frac{\Delta Q_0}{2} (\tau'_{n-1} - \tau'_n) = \Delta W_n. \quad (14)$$

Сделаем допущение, что уровни следуют за расходами и в момент, когда устанавливается расход $Q_0 \pm \Delta Q_0$, глубина достигает своего установившегося значения $H_{уст}$. Следовательно, $\Delta w_n = \Delta w_{on}$ определится положением свободной поверхности воды при двух установившихся движениях с расходами Q_0 и $Q_0 \pm \Delta Q_0$ (фиг. 8). Тогда из (14) получим:

$$\tau'_n = \tau'_{n-1} + 2 \left(\frac{\Delta w_{on}}{\Delta Q_0} - \Delta T_n \right), \quad (15)$$

или, если требуется непосредственно найти значение τ'_n , то

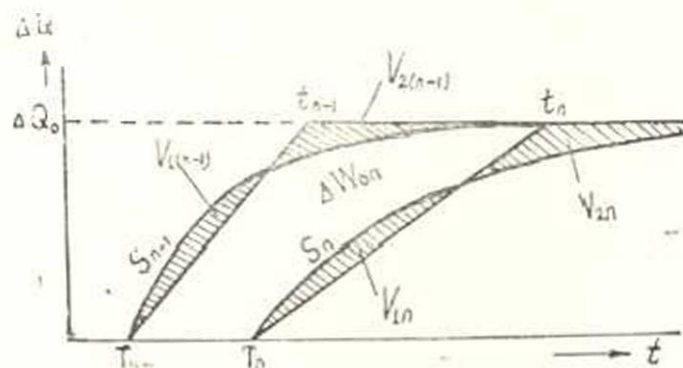
$$\tau'_n = \tau'_0 + 2 \sum_1^n \left(\frac{\Delta w_{on}}{\Delta Q_0} - \Delta T_i \right). \quad (15')$$

Если в начальном створе расход меняется скачком, то нужно подставить в (15') $\tau'_0 = 0$.

При выводе уравнений в основном сделаны следующие допущения:

- а) прямолинейный закон изменения расхода правилен для всех створов, и
- б) уровни следуют за расходами и, следовательно, при расходе $Q_0 \pm \Delta Q_0$ в бьефе устанавливается соответствующая ему при установившемся режиме глубина $H_{уст}$.

Из приведенных сопоставлений было видно, что изменение расхода лучше всего выражается показательной функцией (2). При замене показательной зависимости (2) прямолинейной (13), для сохранения равенства протекающих через данный створ объемов воды по двум законам, необходимо удовлетворить условию $V_1 = V_2$ (фиг. 9).



Фиг. 9.

Такая замена приводит к тому, что если площадь графика между двумя показательными кривыми представляет приращение объема воды Δw_{on} при переходе от одного установившегося режима к другому, то и площадь $T_{n-1} t_{n-1} t_n T_n$, при замене показательных кривых прямыми,

также равна Δw_{0n} , т. е. с достижением расхода $Q_0 + \Delta Q_0$ устанавливается стационарный режим.

Чем медленнее происходит изменение расхода, тем с большей точностью можно показательную кривую заменить прямой линией. С другой стороны с уменьшением интенсивности изменения расхода уменьшается и разница между кривыми $Q = Q(H)$ при установившемся и неустановившемся движениях, т. е. уровни лучше следуют за изменением расхода. Следовательно, полученные зависимости могут давать правильные результаты при значительно медленных изменениях расхода. Надо отметить, что отрицательные волны обычно очень быстро сглаживаются настолько, что закон изменения расхода с достаточной точностью можно принимать прямолинейным.

Отметим, что указанные выше допущения в той или иной форме неоднократно принимались и другими авторами. Например, М. В. Потапов [5] принимает, что если в начальном створе график расходов имеет треугольную форму, то в последующих створах треугольная форма сохраняется; Н. В. Мацицкий [5] и М. А. Великанов [6] зависимость между расходами и уровнями принимают такую же, что и при установившемся движении и т. д. Приемлемость сделанных допущений подтверждается и экспериментально. Так, например, проведенные с большим мастерством опыты И. В. Егизарова [7] в лабораторных условиях показали, что если волна в начальном створе имеет прямолинейное очертание, то оно практически сохраняется вдоль всей длины лотка.

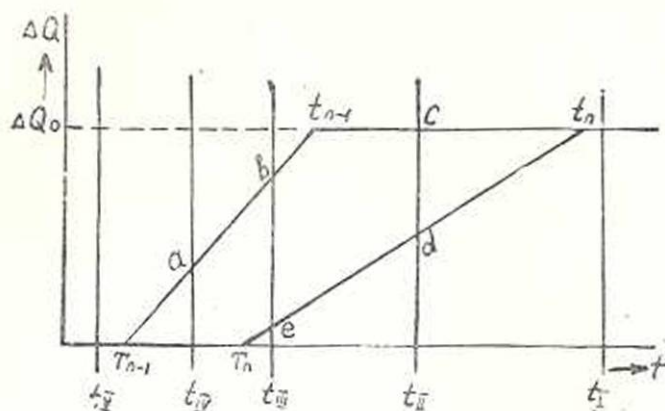
Закон распределения расхода по длине водотока в какой-то момент времени $t = t_1$ получается из (13), если принимать s и T переменными; для случая призматического свободного бьефа этот закон имеет вид:

$$Q = Q_0 \pm \frac{\Delta Q_0(L-s)}{\tau_0 \omega + 2s \left(\omega \frac{\Delta F_0}{\Delta Q_0} - 1 \right)}. \quad (16)$$

Колебание горизонта свободной поверхности воды определяем, как и в случае непрямолинейного изменения расхода, исходя из условия неразрывности потока на данном участке. Рассмотрим случай, когда $t_{n-1} > T_n$ (фиг. 10), т. е. случай, который почти всегда имеет место на практике. Уравнение неразрывности пишется для промежуточного времени $t - T_{n-1}$, где t — любой момент времени. Очевидно, что могут иметь место следующие случаи: 1) $t > t_n$; 2) $t_{n-1} \leq t < t_n$; 3) $T_n \leq t < t_{n-1}$; 4) $T_{n-1} \leq t < T_n$; 5) $t < T_{n-1}$. Рассмотрим эти случаи в отдельности.

1. На всем участке установился стационарный режим и в среднем створе $\frac{s_{n-1} + s_n}{2}$ глубина соответствует установившемуся движению при расходе $Q_0 \pm \Delta Q_0$.

2. В створе s_{n-1} имеется установившееся движение, а в s_n — нет. Приравняв площадь $T_{n-1}t_{n-1}cdT_n$ приращению объема воды на данном участке и решая уравнение относительно глубины, получим после некоторых изменений:



Фиг. 10.

$$H = H_0 + \frac{\Delta Q_0}{2\omega B_{cp}} + \frac{1}{2B_{cp}\Delta s_n} \left[(\Delta Q_0 - \Delta Q_n)(t - T_n) - 2\Delta Q_0 t_{n-1}' \right]. \quad (17)$$

3. В этом случае в пределах данного участка стационарный режим еще не установился ни в одном створе. Применяя условие неразрывности, получим для глубины в среднем створе:

$$H = H_0 + \frac{1}{2B_{cp}\Delta s_n} \left[\Delta Q_{n-1}(t_n - T_{n-1}) - \Delta Q_n(t - T_n) \right]. \quad (17')$$

4. Начало волны, проходя через верхний створ, не дошло еще до конечного. Аналогичным образом, как и в случае непрямолинейного изменения расхода, пользуясь условием неразрывности, найдем глубину в среднем створе $\frac{s_{n-1} + s}{2}$ той части участка, на которую волна успела распространиться

$$H' = H_0 + \frac{\Delta Q_{n-1}}{2\omega B_{cp}}. \quad (17'')$$

5. В этом случае волна еще не нарушила режим на рассматриваемом участке и во всех створах глубины соответствуют установившемуся движению с расходом Q_n .

Так как при выводе уравнений (17), (17') и (17'') предполагалось, что линия свободной поверхности воды прямая, то, во избежание больших ошибок при определении уровней, следует длины расчетных участков брать по возможности малыми.

6. Расчет сложной прямой волны

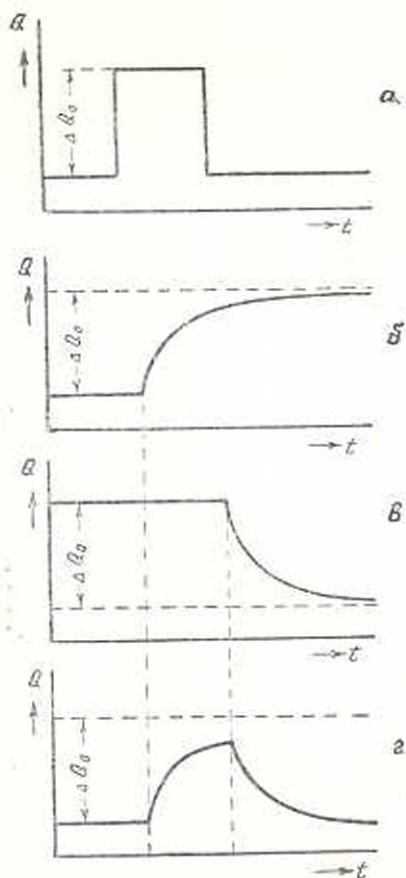
Все вышеизложенное относится к случаю, когда расход изменяется от Q_0 до $Q_0 \pm \Delta Q_0$ и затем остается неизменным во времени. На практике же чаще всего встречаются волны, возникающие в результате изменения расхода по сложному графику с переходящими через нуль значениями градиента $\frac{\partial Q}{\partial t}$. Такую форму имеют, например, графики расходов ГЭС при суточном регулировании, графики пусков из водохранилищ для целей регулирования, график расходов во время наводки или при шлюзовании и т. д.

Сложную волну можно рассчитать, если применить к ней принцип независимости отдельных колебаний, или принцип наложения, как его называет И. В. Егiazаров [8], который впервые применил этот принцип к решению вопросов неустановившегося движения воды. Это приводит к расчету отдельных простых волн, из которых состоит сложная волна, и суммированию полученных результатов. Принцип наложения исходит из того, что законы изменения расходов и уровней воды в каком-нибудь створе, после нарушения данной волны другой волной, остаются тем же, но одно изменение накладывается на другое. На фиг. 11а показан график изменения расхода в начальном створе, состоящего из одного увеличения и одного уменьшения. На фиг. 11б и 11в изображены кривые увеличения и уменьшения расхода в нижерасположенном створе. На фиг. 11г изображена суммарная кривая, представляющая действительное изменение расхода. Таким образом для изменений расхода и уровней в случае сложной волны можно написать:

$$\Delta Q = \pm \Delta Q_1 \pm \Delta Q_2 \pm \dots \pm \Delta Q_n,$$

$$\Delta H = \pm \Delta H_1 \pm \Delta H_2 \pm \dots \pm \Delta H_n. \quad (18)$$

Так как продолжительность пуска постоянных расходов на практике (например, при суточном регулировании) небольшая, то наложение отдельных изменений в нижерасположенных створах приво-



Фиг. 11.

дит к значительному затуханию максимальных расходов и глубин по длине, что видно и на фиг. 11.

Предложенный способ приближенного расчета прямой волны исходит из того, что характер кривых изменения расхода известен и поэтому назван методом кривых расходов. Для пользования этим методом необходимо знать значения установившихся глубин H , приращения расхода ΔQ_0 , приращения глубин $\Delta H_{уст.}$ и объема Δw_0 , а также время ΔT добегания начала волны. Целесообразно эти значения для каждого из участков, на которые разбивается бьеф, иметь в виде следующих зависимостей от глубины H_k в концевом створе участка

$$Q_0 = Q(H_k); \quad w_0 = w(H_k); \quad \Delta T = T(H_k),$$

представленных графически.

Для оценки точности предлагаемого метода кривых расходов был рассчитан случай неустановившегося движения в нижнем бьефе и результаты расчета — кривые расходов в двух створах на расстоянии $s=9,1$ км и $s=12,3$ км от начального створа — сопоставились с результатами опытов СКГУ [2]. Исходным считался створ $s=4,9$ км. Время ΔT пробега данного участка началом волны ($z=0$) было скорректировано опытными данными из-за неполноты необходимых данных. Сопоставления расчета и опыта показаны на фиг. 12 и 12а, где одновременно приведены и результаты расчетов по методам характеристик и мгновенных режимов. Как видно, совпадение неплохое и точность метода достаточна для предварительных расчетов при проектировании и в особенности при планировании суточного регулирования.

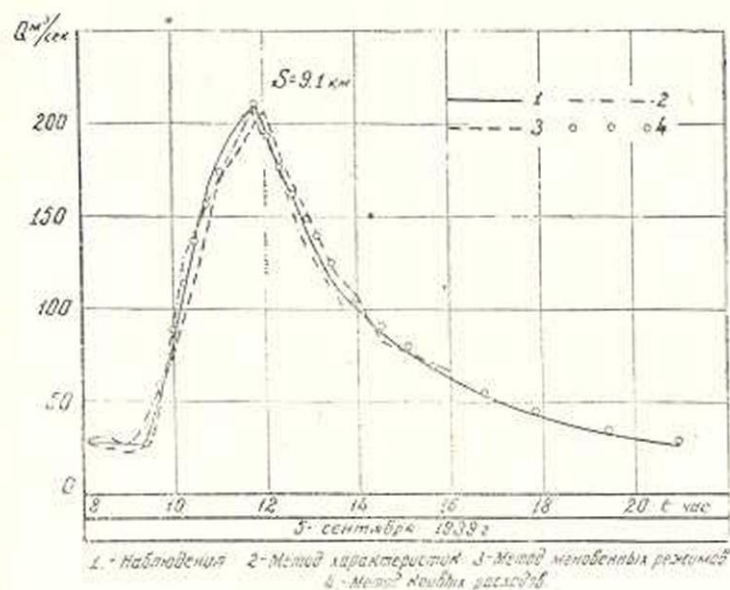
Выводы

1. При линейном изменении расхода в начальном створе в нижерасположенных створах изменение расхода происходит по кривой, которую с достаточной для практики точностью можно выразить уравнением (3), причем входящие в него параметры определяются теоретически.

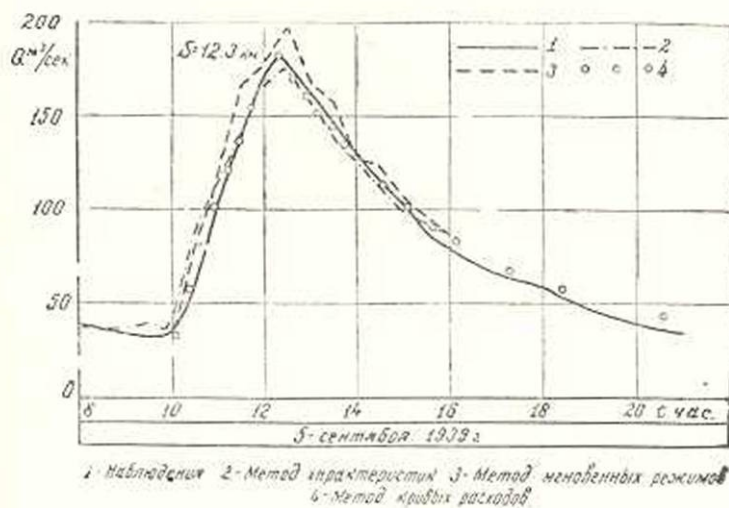
2. Принимая в основу выражение (3), предлагается метод для нахождения расхода и уровня воды в любом створе в любой момент времени при прохождении прямой линии.

3. Для расчета сложной волны последняя разлагается на элементарные (на волны одного направления), которые рассчитываются в отдельности и результаты для одинаковых моментов времени складываются.

4. При медленном линейном изменении расхода в начальном створе оказывается возможным упростить расчетные зависимости для нахождения расхода, если предполагать, что во всех остальных створах расход также меняется по прямой линии, но с по-



Фиг. 12.



Фиг. 12а.

степенно уменьшающейся интенсивностью по расстоянию. Для этого случая получены соответствующие формулы для нахождения расхода и уровня воды.

5. Сопоставление расчета по предложенному методу с результатами опытов и результатами расчетов по „точным“ методам (методы характеристик, мгновенных режимов) показали, что предложенный метод (метод кривых расходов) имеет достаточную для практики точность.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 16 III 1954

ЛИТЕРАТУРА

1. Браславский А. П. Приближенный способ расчета колебаний уровня при неустановившемся движении воды. Труды ГГИ, вып. 26 (80), 1950.
2. Гильденблат Я. Д. и др. Неустановившийся режим нижнего бьефа гидростанций. Проблемы регулирования речного стока, вып. 2, АН СССР, 1948.
3. Рахманов А. И. и Ломоносов И. Г. Неустановившееся движение при пусках и опорожнениях водохранилищ по данным опытов на Тихвинской водной системе. Известия НИИГ, № 25, 1939.
4. ТУИИ проектирования гидротехнических сооружений. Деривационные каналы ГЭС, ч. II, 1948.
5. Ведерников В. В. и др. Неустановившееся движение водного потока в открытом русле, 1947.
6. Великанов М. А. Динамика русловых потоков, 1949.
7. Егiazарян И. В. Неустановившееся движение в дамских бьефах. Известия НИИГ, № 21, 1937.
8. Егiazарян И. В. Гидроэлектрические силовые установки, ч. III, 1937.
9. Егiazарян Б. О. Суточное регулирование деривационных ГЭС с учетом влияния деформации волнового расхода воды. 1952 (диссертация). Автореферат диссертации, 1953.
10. Лось Б. М. Приближенный метод расчета уровней в нижних бьефах гидроэлектростанций при суточном регулировании. Труды Московского энергетического института, вып. V, 1950.

Բ. Հ. Եղիազարյան

ՈՒՂԻՂ ԱԼԻՔԻ ԱՆՑՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ՋՐԻ ԵԼՔԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄՈՏԱՎՈՐ ԵՂԱՆԱԿ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգիածուժ քննարկվում են ալիքի ելքի մոտավոր ու արագ որոշման հնարավորությունները և առաջարկվում է մի եղանակ, որը հենվում է փորձնական տվյալների վրա:

Առաջարկվող եղանակի հիմքում մի դեպքում դրվում է որևէ հատվածքում ելքի՝ ըստ ժամանակի փոփոխումը ցուցչային ֆունկցիայով (2)

արտահայտելու հնարավորությունը, իսկ մյուս դեպքում՝ ելքի ու ժամանակի միջև ցուցչային կապը ուղղադիմ կապով (13) փոխարինելու հնարավորությունը: Երկու դեպքում էլ համապատասխան արտահայտություններ են արտածվում բնդունված կապի մեջ մանող պարամետրների որոշման համար՝ (4), (8) և (15): Առաջարկված եղանակը հնարավորություն է տալիս որոշելու նաև ջրի խորություն փոփոխությունն ըստ ժամանակի, ելքի թև ուղղադիմ և թև կորագիծ փոփոխման դեպքում, ինչպես և որոշելու ելքի բաշխումը ըստ ջրատարի երկարություն՝ որևէ ակնթարթում:

Բարդ ալիքները հաշվելիս օգտագործվում է առանձին փոփոխությունների անկախություն սկզբունքը: Բերված է մի օրինակ (նկ. 12 և 12a), որտեղ առաջարկվող եղանակով կատարված հաշվումները համեմատվում են փորձնական ավյալների և բնութագրերի ու ակնթարթային սեփականի մեթոդներով կատարված հաշվումների արդյունքների հետ: