

Б. О. ЕГИАЗАРЯН

СУТОЧНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ГЭС ВЫШЕЛЕЖАЩИМ ВОДОХРАНИЛИЩЕМ И РЕГУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БЕЗНАПОРНОГО ДЕРИВАЦИОННОГО ВОДОВОДА

Несоответствие между неравномерным потреблением электроэнергии и почти постоянным расходом воды в течение суток приводит к необходимости осуществления суточного регулирования на ГЭС.

В статье рассматриваются вопросы суточного регулирования головным водохранилищем, когда последнее отделено от силового узла станции деривацией. Если деривация напорная, то независимо от ее длины можно считать, что всякое изменение режима станции достаточно быстро передается в головное водохранилище и после некоторых колебаний в деривации устанавливается режим с новым расходом.

Если же деривация безнапорная, то в зависимости от длины, уклона, гидравлического режима канала, степени колебания горизонта воды в головном водохранилище и местных условий возможны два типа деривационного канала: а) саморегулирующийся и б) несаморегулирующийся.

В случае саморегулирующегося деривационного канала изменение поступающего в канал расхода происходит автоматически, без вмешательства эксплуатационного персонала. В результате изменения нагрузки станции в конце канала возникают волны, которые меняют глубину и уклон свободной поверхности в канале в соответствии с новым расходом воды. Распространяясь до головного водохранилища, они отражаются от его поверхности, меняя поступающий в канал расход. Последний, распространяясь волновой скоростью, доходит до напорного бассейна с некоторым сдвигом, равным времени двойного пробега волной всей длины канала. В течение этого времени расходуется регулирующий запас воды в канале. Потеря воды на сброс из напорного бассейна нет. Бермы канала горизонтальны, их высота обусловлена максимально возможной в напорном бассейне отметкой воды.

По мере своего распространения обратные волны сильно деформируются, практически полностью затухая до места выклинивания кривой подпора (спада) [1]. Дойдя до головного водохранилища с уменьшенной величиной максимального расхода, волна меняет поступающий в канал расход на меньшую величину, чем это требуется рабо-

той станции. Волна деформируется и на обратном пути от головного водохранилища до напорного бассейна. Чем длиннее деривационный канал, тем больше деформация волны и, следовательно, тем больше несоответствие между поступающими и требуемыми расходами, что должно покрываться за счет регулирующего объема призмы канала, величина которой ограничена. При большой длине канала (близкой длине кривой подпора в канале) волна деформируется настолько, что доходит до головного водохранилища с незначительной величиной максимального расхода. Головное водохранилище почти полностью отключается, и ведется лишь небольшое регулирование, ограниченное объемом деривационного канала. В таких случаях деривационный канал становится уже несаморегулирующимся. Горизонтальные бермы уже не обеспечивают соответствующего эффекта, приводя лишь к увеличению стоимости канала. Поэтому они делаются параллельными дну канала. Избыток воды сбрасывается через водосброс, сооружаемый в конце канала. Независимость величины расхода воды в деривации от работы станции приводит (особенно в изолированно работающих ГЭС) к большим потерям, для уменьшения которых можно в начале канала изменить расходы в соответствии с графиком нагрузки ГЭС, т. е. осуществить регулирование головным водохранилищем. При этом усложняется эксплуатация деривации.

Ограничивающими факторами при такой схеме суточного регулирования являются деформация и время добегания волны пуска. Возникшая в результате изменения расхода в створе головного водохранилища волна пуска по мере перемещения по каналу деформируется и для установления требуемого расхода в данном створе необходимо все больше времени после того, как начало волны добежало до него [2].

При достаточно большой длине деривации и периодически повторяющихся пусках (что приводит к наложению отдельных пусков) деформация волн может быть настолько значительной, что в конце канала расход практически будет постоянным и равным среднесуточному расходу.

Для перерегулирования расходов деформированной в той или иной мере волны надо в конце канала иметь бассейн необходимой емкости. В тех случаях, когда в конце канала не имеется свободной емкости, а регулирующая призма канала настолько мала, что не в состоянии покрывать недостаток или размещать избыток воды, необходимо в пусках из водохранилища одновременно с учетом времени добегания начала волны учитывать также величину деформации волны, соответственно подбирая очертания графика пусков. Следовательно, деривационный канал при суточном регулировании головным водохранилищем необходимо рассчитывать на пуск максимального расхода, с прибавлением величины его затухания, что значительно увеличивает пропускную способность канала и удорожает его

сооружение. С другой стороны, увеличение пропускной способности канала дает возможность станции в многоводный период несколько увеличить выработку энергии, если имеется потребность в сезонной дополнительной энергии.

Величина этой энергии $\Delta \mathcal{E}$, полученной в результате полного использования пропускной способности деривации и возложения функции суточного регулирования на другие станции системы, можно найти из графика продолжительности мощности (рис. 1, заштрихованная площадь):

$$\Delta \mathcal{E} = (N_{yc} - N_{cp}) t_{yc} + \int_{t_{yc}}^{t_{cp}} (N_{yc} - N_{cp}) dt.$$

Принимая, что кривую $N = f(t)$ в интервале от t_{yc} до t_{cp} можно заменить прямой линией, это выражение приближенно запишется в следующем виде:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{(N_{yc} - N_{cp})(t_{yc} + t_{cp})}{2}, \quad (1)$$

где N_{yc} и t_{yc} — установленная мощность станции (для которой найдена пропускная способность деривации при суточном регулировании головным водохранилищем) и ее обеспеченность в часах, N_{cp} и t_{cp} — средняя мощность станции (для которой найдена пропускная способность деривации при суточном регулировании с помощью БСР) и ее обеспеченность в часах.

Для выбора схемы суточного регулирования головным водохранилищем или специальным бассейном в конце деривации (БСР) необходимо доказать ее экономическую целесообразность, что [5] можно делать сравнением ежегодных издержек для двух схем, принимая при этом, как упрощающее допущение, равенство гидравлических потерь по длине деривации для обеих схем. Разность гидравлических потерь, следовательно и соответствующая ей разность потерь энергии $\Delta \mathcal{E}_n$, величина небольшая и ею можно пренебречь. В случае же необходимости учета этой разности надо на ее величину корректировать значение $\Delta \mathcal{E}$.

Применение головного водохранилища для суточного регулирования очевидно целесообразно, если удовлетворяется условие

$$U_{гв} < U_{БСР}, \quad (2)$$

где $U_{гв}$ — суммарные ежегодные затраты по деривации и водохранилищу при суточном регулировании головным водохранилищем.

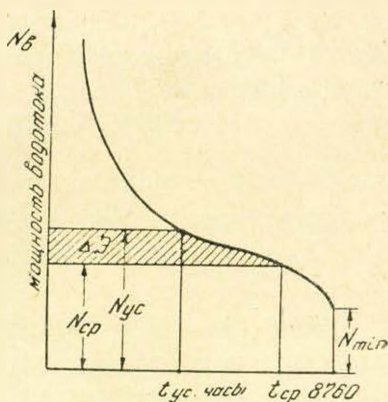


Рис. 1.

$U_{\text{БСР}}$ — суммарные ежегодные издержки по деривации и бассейну при суточном регулировании с помощью БСР.

Будем рассматривать два случая: а) головное водохранилище имеет небольшой объем и создается специально для суточного регулирования и б) головное водохранилище предусматривается для длительного регулирования и его использования для суточного регулирования не связано с дополнительными расходами. На практике больше встречается второй случай.

Рассмотрим сперва первый случай, для которого

$$U_{\text{гв}} = U_{\text{д}} + U_{\text{в}} - \Delta U, \quad (3)$$

$$U_{\text{БСР}} = U_{\text{д}}^* + U_{\text{б}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{д}}$ и $U_{\text{д}}^*$ — ежегодные издержки по деривации в случаях ведения суточного регулирования головным водохранилищем и с помощью БСР;

$U_{\text{в}}$ и $U_{\text{б}}$ — ежегодные издержки по головному водохранилищу и бассейну суточного регулирования;

$\Delta U = b\Delta\mathcal{E}$ — стоимость дополнительной сезонной энергии $\Delta\mathcal{E}$;

b — стоимость 1 квт-ч сезонной энергии.

Годовые издержки можно выразить через капиталовложения K [4]:

$$U = \alpha K.$$

Подставляя это выражение в (2) с учетом (3) и (4), получим следующее неравенство:

$$\alpha_{\text{д}}K_{\text{д}} + \alpha_{\text{в}}K_{\text{в}} - b\Delta\mathcal{E} < \alpha_{\text{д}}^*K_{\text{д}}^* + \alpha_{\text{б}}K_{\text{б}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{д}}$ и $K_{\text{д}}^*$ — капиталовложения по деривации в схемах суточного регулирования головным водохранилищем и с помощью БСР.

$K_{\text{в}}$ и $K_{\text{б}}$ — капиталовложения по головному водохранилищу и БСР;

$\alpha_{\text{д}}$, $\alpha_{\text{д}}^*$, $\alpha_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{б}}$ — коэффициенты, выражающие долю ежегодных эксплуатационных затрат от соответствующих капиталовложений.

Капиталовложения по деривации пропорциональны ее объему и между ними существует прямолинейная связь [4]:

$$\begin{aligned} K_{\text{д}}^* &= K_{\text{од}} + \zeta_{\text{д}}V_{\text{д}} = K_{\text{од}} + \zeta_{\text{д}}FL, \\ K_{\text{д}} &= K_{\text{од}} + \zeta_{\text{д}}V_{\text{д}}' = K_{\text{од}} + \zeta_{\text{д}}F'L, \end{aligned} \quad (6)$$

где $K_{\text{од}}$ — постоянная часть капитальных вложений по деривации, не зависящая от ее объема;

$\zeta_{\text{д}}$ — коэффициент пропорциональности (стоимость одного дополнительного кубометра объема деривации). Из (6) можно получить

$$\zeta_{\text{д}} = \frac{K_{\text{д}} - K_{\text{д}}^*}{V - V_{\text{д}}'},$$

где $V_{\text{д}}$ и F — объем и площадь поперечного сечения деривации при суточном регулировании головным водохранилищем;

V_x и F' — те же при наличии БСР;

L — длина деривационного канала.

Поперечное сечение F можно выразить через F'

$$F = F' + \Delta F, \quad (7)$$

где $\Delta F = \Delta F' + \Delta F''$;

$\Delta F'$ — увеличение площади поперечного сечения канала для пуска дополнительного максимального расхода сверх среднесуточного;

$\Delta F''$ — увеличение площади поперечного сечения, учитывающее увеличение дополнительного максимального расхода волны из-за ее затухания по длине канала.

Подставляя (6) и (7) в (5), после некоторых преобразований получим:

$$\Delta \alpha_d \zeta_d F' L + \alpha_d \zeta_d \Delta F L < \alpha_b K_b - \alpha_n K_n - \Delta \alpha_d K_{од} + b \Delta \mathcal{E},$$

откуда найдем неравенство для длины деривации L , при удовлетворении которого в данных условиях суточное регулирование головным водохранилищем окажется экономически целесообразным:

$$L < \frac{\alpha_b K_b - \alpha_n K_n - \Delta \alpha_d K_{од} + b \Delta \mathcal{E}}{\zeta_d (\Delta \alpha_d F' + \alpha_d \Delta \mathcal{E})}, \quad (8)$$

где для краткости обозначено $\Delta \alpha_d = \alpha_d - \alpha'_d$.

Для указанного выше второго случая, когда головное водохранилище предусматривается для длительного регулирования, в ежегодных суммарных затратах $U_{гв}$ не будут участвовать затраты по водохранилищу U_n , и (3) запишется в следующем виде:

$$U_{гв} = U_d - \Delta U. \quad (3')$$

Тогда (8) соответственно упростится и примет вид:

$$L < \frac{\alpha_b K_b - \Delta \alpha_d K_{од} + b \Delta \mathcal{E}}{\zeta_d (\Delta \alpha_d F' + \alpha_d \Delta F)}. \quad (9)$$

При пользовании этими соотношениями сравнительно большие вычисления приходится производить при определении приращения площади поперечного сечения ΔF , которое зависит от полной пропускной способности канала. Последняя обуславливает также величину возможной дополнительной выработки электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$ и зависит не только от требуемой максимальной нагрузки ГЭС, но и от степени деформации волны пуска по длине деривации. Задача заключается в определении такого графика пусков, который в конце канала, с учетом деформации волны, возможно меньше отличался бы от графика расходов станции. Максимальная ордината такого графика пусков представит и пропускную способность (расчетный расход) канала. Для решения задачи можно пользоваться предложенным автором приближенным методом расчета прямой волны [2], причем задача решается подбором в следующей последовательности.

Имея график расходов станции (рис. 2, жирная линия), определяем очертание графика пусков с тем, чтобы в конце канала получить

наилучшее совпадение двух гидрографов. Если после расчета деформации задаваемого графика окажется, что графики расходов деривации и станции не совпадают, то расчет повторяется при новом графике попусков до тех пор, пока получится приемлемое совпадение. При задании графика попусков надо стремиться к возможно простым очертаниям с наименьшим числом ступеней.

Если в расчете деформации начальные условия неизвестны, то для большей определенности нужно предполагать, что в канале имеется установившееся равномерное движение, соответствующее среднесуточному расходу $Q_{\text{ср. с.}}$. Расчет, поэтому, необходимо начинать с момента, когда расход действительно равняется среднесуточному. В тех случаях, когда в начальный момент $t = 0$ расход не совпадает со среднесуточным, график расходов можно продолжать в пределах пре-

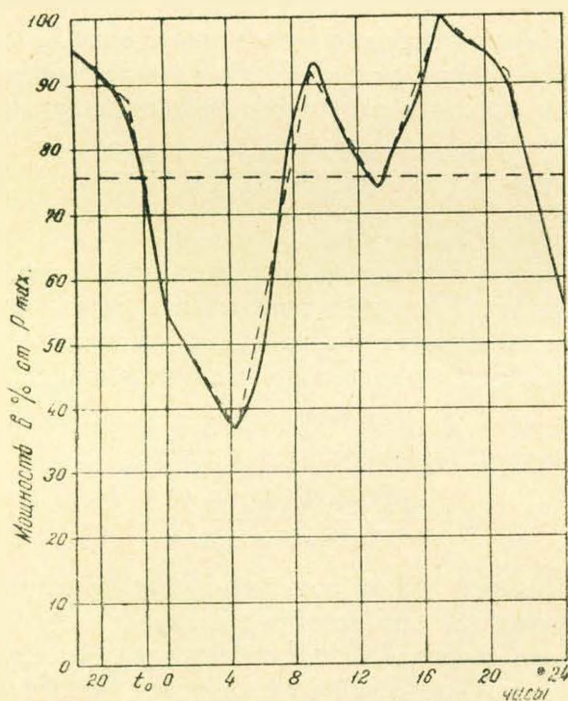


Рис. 2.

дыдущих суток (рис. 2), пока он пересечет линию среднесуточного расхода и соответствующий этой точке момент времени следует принимать за начало отсчета. При этом исходим из того, что график расходов практически повторяется в каждые сутки (в течение определенного промежутка времени).

Для учета влияния начального неустановившегося движения и получения правильной картины установившегося волнового колебания воды в канале нужно продолжать расчет и для первой половины следующих суток. В таком случае предположение о начальном равномерном движении не будет влиять на полученный результат.

В качестве примера на рис. 3 и 4 приводим результаты расчета для одной ГЭС, ведущей суточное регулирование. На рис. 3 сплошная линия выражает график расходов, пересчитанный из графика нагрузки, пунктирная линия — ее схематизация, а линия пунктир с точкой дает полученный расчетом деформированный график в конце деривации, при пусках из головного водохранилища по схематизированному графику. Учитывая степень деформации волны (рис. 3), задаем график пусков, который выражен пунктирной линией на рис. 4.

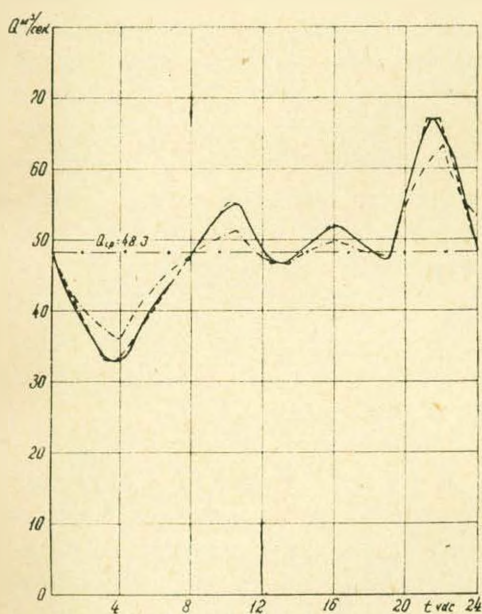


Рис. 3.

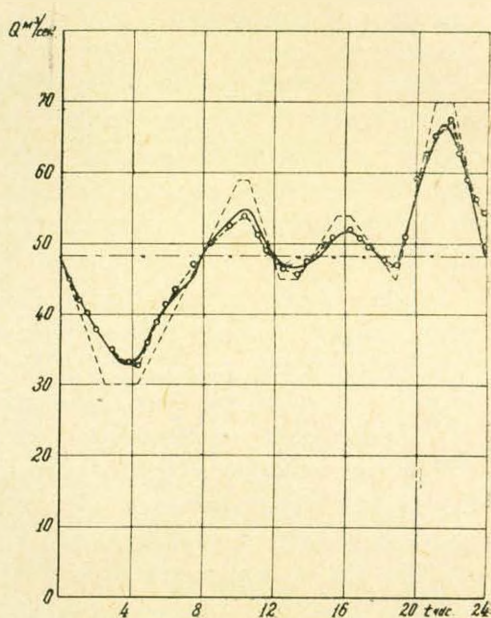


Рис. 4.

Полученный расчетом деформированный график расходов в конце деривации (пунктир с кружочками) хорошо ложится на действительный график расходов станции (сплошная линия), почему пуски из головного водохранилища и можно произвести по принятому графику, обеспечив этим требуемое суточное регулирование без участия БСР.

Следует отметить, что суточное регулирование головным водохранилищем можно осуществить также на станциях, для которых оно не предусмотрено, как, например, в период ремонта или чистки БСР, или же во всех тех случаях, когда по тем или другим причинам нам приходится останавливать работу БСР, а в деривации имеется свободная пропускная способность. В таких случаях для уменьшения холостых сбросов и возможной полноты регулирования пуски из головного водохранилища необходимо делать с учетом времени добегания и деформации волны методом подбора, как было изложено выше.

Так как объем канала может быть использован для перерегулирования расходов, то рассмотрим вопрос регулирующих способностей деривационного канала. Проф. А. А. Морозов пишет: „Так как запас

воды в призме канала обычно весьма ограничен, то он может оказаться достаточным для покрытия только сравнительно небольших увеличений расхода воды; в этом случае мы можем получить существенное ограничение возможностей суточного регулирования" ([3], стр. 64).

Для количественного анализа регулирующих возможностей канала необходимо знать, какая часть объема канала участвует в регулировании. Может показаться, что чем длиннее деривационный канал, тем больше его объем и, следовательно, регулирующие возможности. Но объемы канала выше места практического выклинивания кривой подпора (спада), до которого распространяется волна [1], фактически не участвуют в регулировании. Чем дальше расположен участок канала от створа изменения расхода, тем меньше его роль в обеспечении необходимого объема. Отсюда ясно, что большая длина канала на его регулирующую способность влияет слабо, а после места выклинивания кривой подпора (спада) практически вовсе не влияет.

Объем той части канала, которая участвует в регулировании расходов, зависит от геометрических размеров канала (длина, поперечные размеры, уклон дна) и от условий, в которых работает канал (граничные условия, гидравлический режим, расход).

Забор воды из напорного бассейна диктуется не пропускной способностью напорного трубопровода, а работой турбины. Требуемый ею расход обеспечивается до тех пор, пока еще канал имеет возможность снабжать дополнительный расход за счет сработки своего объема. Но эти возможности ограничены, так как волна не распространяется до истока канала и в канал все время поступает постоянный расход Q_0 . Поэтому в канале, после некоторой сработки объема воды в нем, должен установиться новый установившийся режим с расходом Q_0 . Соответствующая ему кривая свободной поверхности воды в деривационных каналах ГЭС будет иметь вид кривой спада с предельной глубиной на месте перехода в напорный бассейн или же выхода в напорный трубопровод.

Из вышеизложенного следует, что переход от требуемого работой станции расхода к начальному Q_0 происходит довольно быстро, и даже без большой погрешности можно считать, что он происходит мгновенно. Величина объема канала ΔW_0 , участвующего в регулировании, равняется объему воды, заключенному между начальным и конечным положениями свободной поверхности воды в канале.

Имея величину ΔW_0 , график расходов станции и принимая мгновенный переход от большого расхода к Q_0 после полной сработки объема ΔW_0 , легко определить то время, в течение которого регулирование мощности ГЭС за счет сработки объемов деривационного канала еще возможно. Это время равняется промежутку, в течение которого превышающий бытовой сток объем воды равняется регулируемому объему канала ΔW_0 и определяется из равенства:

$$\Delta W_0 = \int_0^{t_1} (Q - Q_0) dt. \quad (10)$$

Время t_1 зависит от очертания графика расходов ГЭС $Q = Q(t)$. В частности, для мгновенного увеличения расхода на ΔQ_0 и дальнейшего постоянства $t_1 = \frac{[\Delta W_0]}{\Delta Q_0}$, а при линейном изменении расхода ГЭС

по времени $Q = kt$, оно будет $t_1 = \sqrt{\frac{2\Delta W_0}{k}}$. Можно также по (10)

найти требуемый регулирующий объем ΔW для промежутка времени t , когда $Q > Q_0$, и сравнением с имеющимся ΔW_0 ответить на вопрос — достаточен ли объем канала для суточного регулирования станции или нет.

Приближенно можно оценить также регулирующие возможности объема саморегулирующегося деривационного канала, если последний имеет значительную длину. Для этого надо поступить следующим образом. Продолжая мысленно деривационный канал выше водоприема, строим кривую свободной поверхности (кривую спада) с первоначальным расходом Q_0 и предельной глубиной в конце канала, находим регулирующий объем канала ΔW_0 , равный объему, заключенному между двумя кривыми свободной поверхности и начальным и конечным створами канала. Теперь уже по (10) можно найти то время t_1 , в течение которого сработкой данного объема можно обеспечить завышенные расходы. Сравнением полученного времени с временем двойного хода волны можно ответить на вопрос — достаточен ли объем канала при данной его длине для обеспечения бесперебойного суточного регулирования.

В обратном случае можно найти тот промежуток времени, в течение которого можно израсходовать воду канала.

Для примера автором был рассчитан регулирующий объем деривационного канала одной из ведущих суточное регулирование ГЭС Армянской энергосистемы. При объеме воды в канале больше 35 000 м³ (среднесуточный расход $Q_{\text{ср. с.}} \approx 50 \text{ м}^3/\text{сек}$) регулирующий объем получился равным $\Delta W_0 \approx 3100 \text{ м}^3$, т. е. меньше одного процента объема воды в канале, а длина канала, практически участвующая в регулировании, составляла всего 2,5 км, при общей длине деривационного канала почти в 20 км. Этот пример показывает, что нельзя надеяться на регулирующие возможности несаморегулирующегося деривационного канала при значительно неравномерном графике потребления.

Բ. 2. ԵՂԱԶԱՐՅԱՆ

ՀԻՊՐՈԿԱՅԱՆԻ ՈՐԱԿԱՆ ԿԱՆՈՆԱՎՈՐՈՒՄԸ ՎԵՐԻՆ ԶՐԱՄԲԱՐՈՎ ԵՎ ՈՉ
ՃՆՇՄԱՆ ԴԵՐԻՎԱՅԻՈՆ ԶՐԱՆՑՔԻ ԿԱՆՈՆԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգվածում գիտվում է վերին ջրամբարի միջոցով հիդրոէլեկտրակայանների օրական կանոնավորման հնարավոր դեպքերը, նրանց առավելությունները և թերությունները, կանոնավորման սահմանափակումները, որոնցից առանձնապես աչքի է ընկնում ջրի ելքերի հիդրոպրաֆի ղեկավարման ըստ ճանապարհի երկարություն: Այլ ղեկավարման, որը հետևանք է ջրանցքում շփման և իներցիոն ուժերի ազդեցության, կարող է բերել նրան, որ հիդրոկայանի անհրաժեշտ ջրի քանակությունը հարկավոր ժամանակում չի ապահովվի, ուստի անհրաժեշտ է այն հաշվի առնել կանոնավորման հաշվարկներին ժամանակ:

Օրական կանոնավորում կատարելու նպատակով վերին ջրամբարի օգտագործման դեպքում վերանում է հատուկ օրական կանոնավորման ավագանի կառուցման անհրաժեշտությունը և ի հաշիվ ջրանցքի մեծացած թողունակության հնարավորություն է ստեղծում գարնան հորդացումների ժամանակ լրացուցիչ էներգիա ստանալ, որի քանակը որոշված է ըստ (1) բանաձևի: Սակայն ջրանցքի թողունակության մեծացումը մյուս կողմից բերում է նրա չափերի մեծացման և թանկացման:

Օրական կանոնավորման տարբեր սխեմաների համեմատության և ամենից էկոնոմիկ սխեմայի բնորոշված նպատակով դուրս են բերված հաշվաչին բանաձևեր, որտեղ հաշվի է առնված ալիքի ղեկավարման ազդեցությունը և լրացուցիչ էներգիայի ստացման հնարավորությունը վերին ջրամբարի՝ օրական կանոնավորման նպատակով օգտագործման դեպքում: Տնտեսական համեմատությունը կատարված է ըստ օրական կանոնավորման տարբեր սխեմաների շահագործման ծախսերի: Ստացված (8) և (9) բանաձևերը հնարավորություն են տալիս որոշել ջրանցքի այն երկարությունը, որի դեպքում կանոնավորումը վերին ջրամբարի միջոցով կլինի տնտեսապես ձեռնառու:

Հոգվածում գիտարկված է նաև ղերիվացիոն ջրանցքի կանոնավորման հնարավորությունների հարցը և ապացուցված է, որ ջրանցքը իր լրիվ ծավալի շատ փոքր մասով միայն կարող է մասնակցել կանոնավորմանը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Егиазарян Б. О. Суточное регулирование деривационных ГЭС с учетом деформации волнового расхода воды. Автореферат, Ереван, 1953.
2. Егиазарян Б. О. Приближенный способ нахождения расхода воды в любом створе водотока при прохождении прямой волны. «Известия АН Армянской ССР», ОФМЕТ наук, № 3, 1955.
3. Морозов А. А. Использование водной энергии М., 1948.
4. Егиазаров И. Р. Гидравлические силовые установки, ч. III. М., 1937.
5. Егиазарян Б. О. О двухбассейновом суточном регулировании на деривационных ГЭС. Сборник научных трудов ЕрПИ, № 14, вып. 2, 1956.