

# ГИДРОТЕХНИКА

Л. А. ЧИЛИНГАРЯН

## К ВОПРОСУ РАЗБИВКИ ГОРНЫХ ВОДОТОКОВ НА СТУПЕНИ КАСКАДА ДЕРИВАЦИОННЫХ ГЭС

Для составления схемы энергетического использования водотока рассматривают варианты разбивки его на отдельные ступени, исходя при этом из гидрологических, топографических, геологических и прочих условий.

Оптимальный вариант разбивки падения реки на ступени устанавливается в результате энерго-экономического анализа, в котором энергетические расчеты являются необходимым звеном всего расчета. Поэтому для полной оценки энергетических возможностей реки в анализе вариантов должны быть рассмотрены и энергетически целесообразные схемы разбивки, при которых обеспечивается максимальный энергетический эффект (выработка энергии, мощность).

Методы составления таких схем даны в работах Сейфуллы Д. О. [3] и Семенова В. В. [4], которые в сущности одинаковы. Они предназначены для выбора напорной схемы каскада деривационных ГЭС, с учетом энергетического эффекта.

По методу Сейфуллы Д. О. по имеющейся напорной характеристике (кривой роста среднегодовых расходов реки  $Q_0$  по мере роста ее падения  $H$ ) (рис. 1а), строится мощностная характеристика  $N = f(Q_0, H)$  с одновременной разбивкой реки на ступени каскада ГЭС (рис. 1б). С удалением водозабора деривации от конца рассматриваемого участка вверх по течению используемый напор будет возрастать, а расход уменьшаться. В соответствии с этим, мощность будет либо непрерывно возрастать, при относительно малом уменьшении захватываемого деривацией расхода, либо, возрастая достигнет максимума и затем снова начнет уменьшаться с увеличением напора  $H$ , за счет значительного уменьшения  $Q_0$ . Точка, соответствующая максимуму  $N$  определит первую (снизу) ступень каскада. Таким же образом могут быть найдены следующие ступени каскада.

Для возможности учета вопросов водно-энергетического регулирования, Семенов В. В. предлагает разбивку вести сверху вниз, соблюдая на каждой ступени условие:

$$N_{\text{ср. и.}} - N_{\text{ср. нн.}} = \text{макс.}$$

где  $N_{\text{ср. и.}}$  и  $N_{\text{ср. нн.}}$  — соответственно средняя используемая и неисполь-

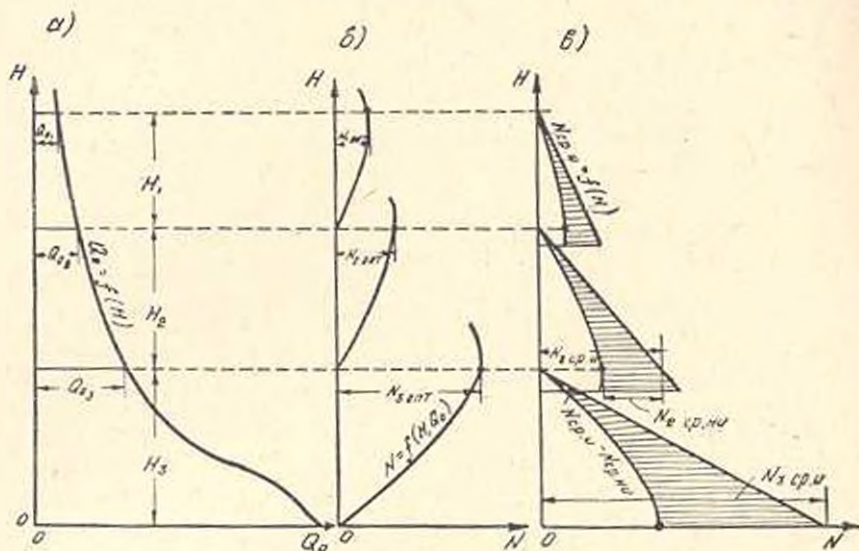


Рис. 1.

зубаемая мощности на участке деривационной ступени — причем, под последней понимается мощность, соответствующая местной приточности между водозабором и силовым узлом ГЭС.

Необходимо отметить, что в случае, когда створ водозабора верхней установки в обоих методах взяты одинаковыми, то результаты разбивки водотока на ступени, при отсутствии регулирования, у Сейфуллы и Семенова совпадают, что и указано в [4].

При такой разбивке суммарная мощность всех установок на данном участке для получаемого числа ступеней не будет максимальной, так как напоры их оптимальны только при рассмотрении эффективности установок в отдельности. Между тем необходимо учесть общий энергетический эффект рассматриваемого каскада ГЭС в целом. Такая попытка сделана в настоящей работе.

В статье предлагается метод составления оптимальной, с энергетической точки зрения, схемы энергоиспользования малой горной реки между значительными ее притоками применительно к каскадам деривационных незарегулированных ГЭС. Дается также способ дальнейшего энерго-экономического анализа для выбора оптимального варианта из числа энергетически целесообразных схем.

Энергетически оптимальной схемой считается схема с максимальным энергетическим эффектом, под которым понимается суммарная годовая выработка энергии (или среднегодовая мощность) каскада ГЭС в среднем по водности году.

Таким образом, поставленной основной задачей является определение соотношения напоров ступеней (напорную схему), соответствующего энергетически оптимальной схеме при определенном числе ступеней.

В работе принимается допущение, что обеспеченность расчетного расхода для любых створов участка реки известна, т. е., что задан расчетный расход для каждого створа. Принимается также, что к. п. д. ГЭС ( $\eta_k$ ) каскада равны между собою и не зависят от напора.

Необходимым условием решения поставленной задачи и основой гидроэнергетического анализа, при составлении напорной схемы, принимается напорная характеристика реки. Последняя здесь представляет из себя кривую роста средних используемых расходов  $Q_{с.н.}$  по мере падения  $H$  водотока  $Q_{с.н.} = f(H)$ , в отличие от кривой роста среднеемноголетних расходов принятой в работах [3] и [4].

Определяя понятие напорной характеристики, заметим, что энергия, которую можно было получить за счет местной приточности на участке реки в пределах деривации той или иной ГЭС — не используется. Поэтому возникает вопрос о таком размещении заданного числа ступеней, которое позволило бы максимально уменьшить теряемую энергию местной приточности. Следует отметить, что указанное неполное использование энергии местной приточности имеет место только в случае деривационных ГЭС.

Если иметь кривую обеспеченности расходов  $P(Q)$  для любых створов участка реки, то для этих створов  $Q_{с.н.}$  можно подсчитывать по формуле:

$$Q_{с.н.} = \frac{1}{100} \int_0^{Q_p} P(Q) dQ \quad (1)$$

где  $Q_p$  — расчетный расход заданной обеспеченности.

Наращение расхода  $Q_{с.н.}$  на малых горных реках между ее значительными притоками происходит плавно или со сравнительно малыми скачками. Его можно выразить при помощи многочлена вида

$$Q = Q_0 + \alpha_1 H + \alpha_2 H^2 + \dots + \alpha_n \cdot H^n, \quad (2)$$

или параболической кривой

$$Q = Q_0 + \alpha H^2 \quad (3)$$

Здесь  $Q_0$  — средний используемый расход в начале рассматриваемого участка,

$Q$  — то же, в точке с падением  $H$ , считая от начала (в дальнейшем индекс к  $Q_{с.н.}$  опускается),

$\alpha$  и  $\gamma$  — постоянные коэффициенты.

Зависимостью (2) можно выразить действительную кривую напорной характеристики с большей точностью, чем по (3), однако последняя более удобна для математического анализа, а точность ее практически достаточна, что подтверждается нашими подсчетами, проведенными применительно к малым рекам АрыССР.

Например, для реки Гарпи (приток р. Памбак) на одном участке (ГЭС III—VII по данным [5, г. V]) напорную характеристику, при

шестимесячной обеспеченности расчетного расхода, можно с достаточной точностью выразить формулой (рис. 2а):

$$Q = 0,57 + 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot H^{1,75} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для р. Дали (приток р. Арпы) [5, т. XII] на некотором участке (рис. 2б)

$$Q = 0,144 + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot H^{0,5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Многие малые реки Армении имеют прямолинейную напорную

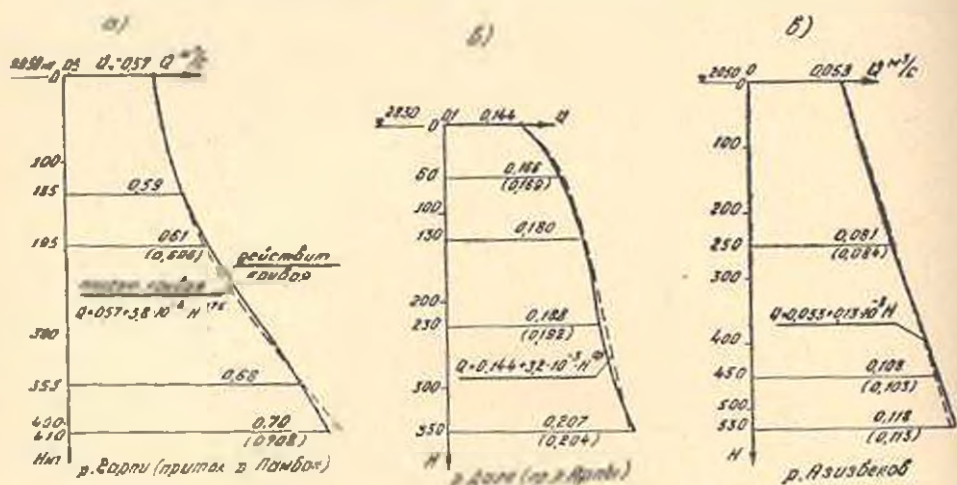


Рис. 2.

характеристику. Например, р. Азизбеков [5, т. XII] на некотором участке (рис. 2в):

$$Q = 0,053 + 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot H \text{ м}^3/\text{с},$$

р. Акстафа [5, т. VII]

$$Q = 0,42 + 5,7 \cdot 10^{-1} \cdot H \text{ м}^3/\text{с. и т. д.}$$

Параметры ф-лы (3) определяются методом наименьших квадратов или подбором постоянных коэффициентов.

Если участок реки используется в одной ступени, то напор ее  $H_1 = H_{\text{уч}}$  и расход  $Q_1 = Q_{\text{н}}$ . Здесь  $H_{\text{уч}}$  — падение на данном участке.

При двух ступенях использования условия задачи следующие:

$$H_1 + H_2 = H_{\text{уч}},$$

$$Q_1 = Q_{\text{н}} \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_1 + \alpha H_1$$

Условие максимума выработки энергии на двух ГЭС каскада будет

$$\Sigma_{\text{тоз}} = a_1 (H_1 Q_1 + H_2 Q_2) = \text{макс.} \quad (5)$$

Здесь  $a_1 = 9,81 \cdot \eta_{\text{г}} \cdot 8760$ .

Поскольку коэффициент  $a_1$  — постоянный, то условие получения максимума выработки энергии на участке сводится к простой математической

типической задаче отыскания максимума двухступенчатой площади, вписанной в кривую напорной характеристики рассматриваемого участка и определяемой суммой  $H_1 Q_1 + H_2 Q_2$  (заштрихованная площадь на фиг. 3а). Подставляя в (5) значения  $H_2$  и  $Q_2$  из (4), дифференцируя  $\mathcal{E}_{\text{топ}}$  по  $H_1$  и приравняв нулю имеем:

$$\alpha H_1^{\gamma-1} [\gamma \cdot H_{\text{уч}} - (\gamma + 1) H_1] = 0,$$

отсюда:

$$H_1 = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \cdot H_{\text{уч}} \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{1}{\gamma + 1} \cdot H_{\text{уч}} \quad (6')$$

Из (6) и (6') видно, что оптимальное отношение напоров не зависит от расхода в начале участка  $Q_0$  и от коэффициента  $\alpha$ , а зависит только от показателя степени  $\gamma$ . Замечаем также, что при значениях  $\gamma > 1,0$ , т. е. при вогнутости кривой напорной характеристики,  $H_1 > 0,5 \cdot H_{\text{уч}}$  и наоборот, при  $\gamma < 1,0$ , т. е. при выпуклости кривой (3)  $H_1 < 0,5 \cdot H_{\text{уч}}$ .

В таблице 1 приведены оптимальные отношения  $\frac{H_1}{H_{\text{уч}}}$  и  $\frac{H_2}{H_{\text{уч}}}$  для разных значений  $\gamma$ .

Таблица 1

| $\gamma$                    | 0,5   | 0,75 | 1,0 | 1,25  | 1,5 | 1,75  | 2,0   | 2,25  | 2,5   |
|-----------------------------|-------|------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{H_1}{H_{\text{уч}}}$ | 0,333 | 0,43 | 0,5 | 0,555 | 0,6 | 0,636 | 0,667 | 0,693 | 0,714 |
| $\frac{H_2}{H_{\text{уч}}}$ | 0,667 | 0,57 | 0,5 | 0,445 | 0,4 | 0,364 | 0,333 | 0,307 | 0,286 |

В случае разбивки на три ступени, условиями задачи будут (рис. 3б),

$$H_1 + H_2 + H_3 = H_{\text{уч}}$$

$$Q_1 = Q_0; Q_2 = Q_1 + \alpha H_1^{\gamma}$$

$$Q_3 = Q_1 + \alpha (H_1 + H_2)^{\gamma} \quad (7)$$

Условие максимума выработки энергии:

$$H_1 Q_1 + H_2 Q_2 + H_3 Q_3 = \text{макс.} \quad (8)$$

Подставляя в (8) значения  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $H_2$  из (7) и дифференцируя по  $H_1$  и  $H_3$ , из условия максимума находим:

$$H_1 = \frac{\gamma \cdot c_1}{\sqrt[\gamma]{c \left( \gamma \cdot c_1 + c_1 - 1 \right)}} \cdot H_{\text{уч}} \quad (9)$$

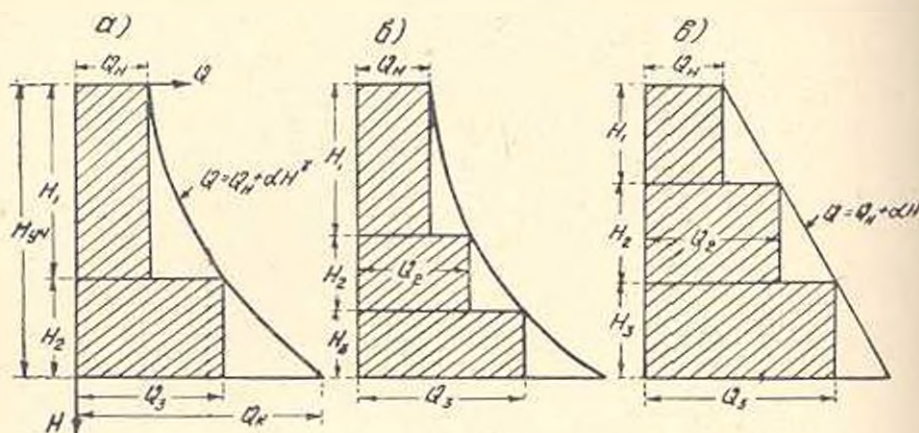


Рис. 3.

$$H_2 = \frac{c_1}{\sqrt{c_1 \left( \gamma \cdot c_1 + c_1 - 1 \right)}} \cdot H_{yч} \quad (9')$$

Из (7) же имеем  $H_3 = H_{yч} - H_1 - H_2$ ;

Здесь введено обозначение  $c_1 = \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)^2$

В таблице 2 приведены оптимальные отношения  $\frac{H_1}{H}$ ;  $\frac{H_2}{H_{yч}}$  и

$\frac{H_3}{H_{yч}}$  для разных значений  $\gamma$ .

Таблица 2

| $\gamma$             | 0,5  | 0,75  | 1,0   | 1,25  | 1,5   | 1,75  | 2,0   | 2,25  | 2,5   | 3,0   |
|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{H_1}{H_{yч}}$ | 0,13 | 0,265 | 0,333 | 0,393 | 0,441 | 0,485 | 0,522 | 0,556 | 0,581 | 0,628 |
| $\frac{H_2}{H_{yч}}$ | 0,36 | 0,353 | 0,333 | 0,314 | 0,294 | 0,277 | 0,251 | 0,247 | 0,232 | 0,21  |
| $\frac{H_3}{H_{yч}}$ | 0,46 | 0,382 | 0,333 | 0,293 | 0,264 | 0,238 | 0,217 | 0,197 | 0,187 | 0,162 |

Из таблицы видно, что относительный напор первой ступени тем больше, по сравнению с напорами второй и третьей ступеней, чем больше показатель степени  $\gamma$ , напоры второй и третьей ступеней, наоборот, уменьшаются с увеличением  $\gamma$ , причем  $\frac{H_3}{H_{yч}}$  в большей мере,

чем  $\frac{H_2}{H_{yч}}$ .

В случае разбивки на четыре ступени аналогичное решение будет:

$$H_1 = \frac{\gamma}{D_1(\gamma + 1) - c_1} \cdot H_{yn} \quad (10)$$

$$H_2 = \frac{1}{D_1(\gamma + 1) - c_1} \cdot H_{yn} \quad (10')$$

$$H_3 = \frac{(c_1 - 1)(\gamma + 1)}{\gamma \cdot c_1 D_1(\gamma + 1) - \gamma \cdot c_1} \cdot H_{yn} \quad (10'')$$

$$H_4 = H_{yn} - H_1 - H_2 - H_3.$$

Здесь введены обозначения:

$$c_1 = \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^2; D_1 = 1 + \frac{1}{\gamma} + \frac{(c_1 - 1)(\gamma - 1)}{\gamma^2 \cdot c_1}.$$

Ниже приведена таблица 3 оптимальных отношений

$$\frac{H_1}{H_{yn}}; \frac{H_2}{H_{yn}}; \frac{H_3}{H_{yn}} \text{ и } \frac{H_4}{H_{yn}} \text{ для}$$

Таблица 3

| $\gamma$             | 0,5   | 0,75  | 1,0  | 1,25  | 1,5   | 1,75  | 2,0   |
|----------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{H_1}{H_{yn}}$ | 0,076 | 0,158 | 0,25 | 0,342 | 0,427 | 0,502 | 0,57  |
| $\frac{H_2}{H_{yn}}$ | 0,152 | 0,21  | 0,25 | 0,274 | 0,285 | 0,280 | 0,275 |
| $\frac{H_3}{H_{yn}}$ | 0,154 | 0,232 | 0,25 | 0,256 | 0,255 | 0,215 | 0,165 |
| $\frac{H_4}{H_{yn}}$ | 0,578 | 0,40  | 0,25 | 0,128 | 0,033 | 0,003 | 0,0   |

разных значений  $\gamma$ . Из таблицы видно, что оптимальные относительные напоры первой и четвертой ступеней при значениях  $\gamma \leq 0,5$  и  $\gamma > 1,5$  соответственно, сравнительно малы. Следовательно, при небольшом напоре на участке деление его на четыре ступени нецелесообразно.

Из таблиц 1, 2, 3 видно также, что при прямолинейной напорной характеристике ( $\gamma = 1,0$ ) при любом числе ступеней высота участка делится на равные части (рис. 3в).

Аналогичным образом можно решить задачу и в случае разбивки участка на пять, шесть и большее число ступеней.

Полученные выше оптимальные отношения напоров ступеней соответствуют случаю полного использования падения на данном участке. Интересно отметить, что отбросив некоторую верхнюю часть участка, можно получить при одном и том же числе ступеней больше энергии, чем при использовании всего падения на участке. Оптимальная высота отбрасываемой части зависит от характера и параметров

напорной характеристики, а также от заданного числа ступеней каскада.

При одной ступени с учетом отбрасываемой верхней части высотой  $H_x$  (рис. 4а) среднегодовая мощность ГЭС будет:

$$N'_1 = 9.81 \gamma_2 (H_{yч} - H_x) (Q_n + \alpha H_x^3).$$

Условие максимума мощности запишется в виде:

$$\frac{dN'_1}{dH_x} = Q_n + H_x^3 \cdot \alpha \cdot (1 + \gamma_2) - H_x^{3-1} \cdot \alpha \cdot \gamma_2 \cdot H_{yч} = 0, \quad (11)$$

откуда:

$$H_x = \sqrt[3]{\frac{Q_n}{\alpha \cdot \gamma_2 \cdot (H_{yч} - H_x) - \alpha \cdot H_x}} \quad (11')$$

В общем случае,  $H_x$  можно определить из (11') методом последовательного приближения или из (11) — графоаналитическим способом.

В частном случае при  $\gamma = 0,5$  из (11) получаем:

$$H_x = \frac{\alpha \cdot H_{yч}}{3\alpha + 2Q_n}. \quad (11'')$$

При  $\gamma = 1$ ;

$$H_x = \frac{\alpha H_{yч} - Q_n}{2\alpha} \quad (12)$$

при  $\gamma = 2$

$$H_x = \frac{2 \cdot \alpha \cdot H_{yч} \pm \sqrt{4 \cdot \alpha \cdot H_{yч}^2 - 12 \cdot \alpha \cdot Q_n}}{6\alpha} \quad (12')$$

В случае двух ступеней (рис. 4б) при учете  $H_x$  меняются оптимальные отношения напоров ступеней определяемые по (6) и (6').

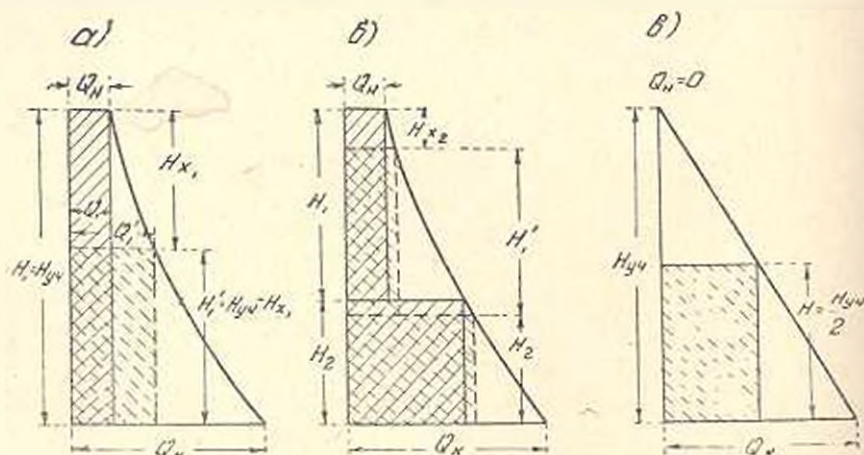


Рис. 4.

Только при прямолинейной напорной характеристике ( $\gamma = 1,0$ ) падение участка укороченное на  $H_x$  также делится на равные части.

Суммарная среднегодовая мощность двухступенчатого каскада с учетом  $H_x$  будет:

$$\sum_1^2 N_i = 9,81 \cdot \gamma \{ H_1 (Q_n + \alpha \cdot H_1^3) + (H_{yn} - H_1 - H_x) [Q_n + \alpha (H_1 + H_x)^3] \} \quad (13)$$

Максимуму  $\sum_1^2 N_i$  отвечают условия:

$$\frac{\partial \sum_1^2 N_i}{\partial H_x} = \alpha \cdot \gamma \cdot H_1 H_x^{-1} - Q_n + \alpha (H_1 + H_x)^3 [\gamma \cdot H_{yn} - (H_1 + H_x)(\gamma + 1)] = 0; \quad (13')$$

$$\frac{\partial \sum_1^2 N_i}{\partial H_1} = \alpha H_x^3 + \alpha (H_1 + H_x)^3 [\gamma \cdot H_{yn} - (H_1 + H_x)(\gamma + 1)] = 0; \quad (13'')$$

Совместное решение уравнений (13') и (13''), которое в общем случае легко выполнить графоаналитическим способом, даст оптимальные значения  $H_x$  и  $H_1$ .

В частном случае при  $\gamma = 1,0$  из (13') и (13'') получаем:

$$H_x = \frac{\alpha H_{yn} - 2 Q_n}{3\alpha} \quad (14)$$

$$H_1 = \frac{\alpha H_{yn} + Q_n}{3\alpha} \quad (15)$$

Аналогичным образом можно поступить в случае трех и более ступеней.

При трех ступенях использования в частном случае когда  $\gamma = 1,0$  получаем:

$$H_x = \frac{\alpha H_{yn} - 3 Q_n}{4\alpha} \quad (16)$$

Для характерного случая прямолинейной напорной характеристики ( $\gamma = 1,0$ ), из трех случаев — одноступенчатого, двухступенчатого и трехступенчатого использования, на основании (12), (14) и (16) можно вывести общую формулу для определения  $H_x$  при  $n$  — ступенчатом варианте, а именно:

$$H_{x,n} = \frac{\alpha \cdot H_{yn} - n Q_n}{(n+1) \cdot \alpha} \quad (17)$$

или, подставляя значение  $\alpha = \frac{Q_n - Q_x}{H_{yn}}$  (где  $Q_x$  — средний используемый расход в конце рассматриваемого участка), будем иметь:

$$H_{x,n} = \frac{H_{yn}}{n} \cdot \frac{Q_n - (n+1) Q_x}{Q_n - Q_x}. \quad (17')$$

При расчете необходимо проверить знак  $H_x$ . Последний будет положительным, если  $Q_n > (n+1) Q_x$ . Отрицательный знак при  $H_x$  означает, что в данном случае полное использование падения участка дает

наибольший энергетический эффект, и необходимость в учете  $H_x$  отпадает.

Из ф-л (17) и (17') можно сделать вывод, что оптимальное значение  $H_x$  тем больше, чем больше коэффициент нарастания расходов  $\alpha$  и падение участка  $H_{yч}$  и чем меньше число ступеней  $n$ .

Для сравнения получаемых энергетических эффектов при разбивке участка реки на различное число ступеней и при полном и неполном (с учетом  $H_x$ ) использовании падения, определим среднегодовую мощность каскада ГЭС при прямолинейной напорной характеристике.

При полном использовании всего падения участка в одной ступени

$$N_1 = 9,81 \cdot \eta_r \cdot Q_n \cdot H_{yч};$$

или подставляя значение  $Q_n = Q_k - \alpha H_{yч}$ ;

$$N_1 = 9,81 \cdot \eta_r \cdot H_{yч} (Q_k - \alpha H_{yч}).$$

При двух ступенях

$$\sum_1^2 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \left[ \frac{H_{yч}}{2} \cdot Q_n + \frac{H_{yч}}{2} \left( Q_n + \alpha \cdot \frac{H_{yч}}{2} \right) \right] = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{H_{yч}}{4} (3Q_n + Q_k)$$

или

$$\sum_1^2 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{H_{yч}}{2} \cdot \left( 2 Q_k - \frac{3}{2} \cdot \alpha \cdot H_{yч} \right).$$

При трех ступенях

$$\sum_1^3 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{3} \cdot H_{yч} \cdot (Q_k + 2 Q_n);$$

или

$$\sum_1^3 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{3} \cdot H_{yч} (3 Q_k - 2 \alpha \cdot H_{yч}).$$

При  $n$  ступенях

$$\sum_1^n N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{n} \cdot H_{yч} \left( \frac{n+1}{2} Q_k + \frac{n-1}{2} Q_n \right); \quad (18)$$

или

$$\sum_1^n N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{n} \cdot H_{yч} \left( n \cdot Q_k - \frac{n-1}{2} \alpha \cdot H_{yч} \right). \quad (18')$$

При учете  $H_x$ , при одной ступени

$$N_1 = 9,81 \cdot \eta_r \cdot (H_{yч} - H_x) (Q_n + \alpha H_x) = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{4\alpha} Q_k^2$$

(здесь учтено значение  $H_x$  из (12) и  $Q_n = Q_k - \alpha H_{yч}$ , поэтому имеет место при  $\alpha H_{yч} > Q_n$ ).

При двух ступенях:  $\sum_1^2 N_i' = 9,81 \cdot \tau_r \cdot \frac{1}{32} \cdot Q_k^3$

При трех ступенях:  $\sum_1^3 N_i' = 9,81 \cdot \tau_r \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{3}{8} \cdot Q_k^3$

При  $n$  ступенях:  $\sum_1^n N_i' = 9,81 \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{n}{2(n+1)} \cdot Q_k^3$  (19)

Ур-ние (19) действительно при  $Q_k > (n+1) Q_m$ .

Суммарная среднегодовая мощность (или годовая выработка энергии) всех ГЭС каскада, при разбивке участка реки вышеизложенным методом, при одинаковых исходных данных, (напор на участке, вид напорной характеристики, число ступеней) получается больше, чем при разбивке по методам, предложенным в работах [3, 4] и конкретных схемах [5]. Так, например, при прямолинейной напорной характеристике, выработка энергии каскада из 2-х ступеней, при разбивке по предлагаемому методу на 5,5% больше, чем при разбивке по предложенному в литературе [3] методу, а при 3-х ступенях — на 11,5% и т. д. Это увеличение больше при выпуклой напорной характеристике.

Заметим также, что рассчитанные по методам предложенным в литературе [3] и [4], напоры нижних станций получаются значительно больше, чем для верхних (особенно при выпуклой напорной характеристике), что противоречит установленному практикой проектирования целесообразному сочетанию напоров на большинстве горных рек.

Кроме того, предлагаемый метод имеет то преимущество перед указанными выше методами, что может быть использован для составления вариантов схемы использования заданного участка водотока при разном числе ступеней.

Выше изложен энергетический метод разбивки падения реки на ступени. Поскольку энергетические расчеты являются лишь одним из необходимых звеньев энерго-экономического анализа, схемы и основные параметры каскада ГЭС, определенные на основе предлагаемого метода, должны быть проверены и обоснованы энерго-экономическими расчетами.

Действительно, энергетические методы не могут дать окончательного ответа на вопрос об оптимальных параметрах установок. Так, например, из изложенного выше анализа и из ф-л (18), (18') и (19) вытекает, что при оптимальной разбивке падения участка реки суммарный энергетический эффект использования получится тем выше, чем больше число ступеней каскада.

Значит нельзя говорить об определенном оптимальном числе ступеней с чисто энергетической точки зрения, хотя при применении некоторых других методов [3, 4] получается обратный вывод.

Установление оптимального числа ступеней является энерго-экономической задачей.

Но известно, что энерго-экономические расчеты не являются единственным критерием нахождения оптимального варианта, они служат для выявления энерго-экономической эффективности [1]. По инструкции [2] рекомендуется устанавливать целесообразный вариант схемы использования реки с точки зрения достижения максимального энергетического эффекта на рассматриваемом участке. Следовательно, варианты схем энергоиспользования реки, с различным числом ступеней, составленные на основе предлагаемого энергетического расчета могут и должны служить основой для варианта технико-экономического анализа.

Оптимальное число ступеней в таком случае можно установить следующим образом. Для различных чисел ступеней производить разбивку по предлагаемому методу, с введением при этом, некоторого корректива, учитывающего местные условия. Затем, определяя энерго-экономические показатели этих вариантов, выбрать вариант, обеспечивающий минимум издержек в системе ( $U_c = \text{минимум}$ ). Если река по гидрологическому признаку разбита на несколько участков, то необходимо произвести выбор из разных комбинаций чисел ступеней на этих участках.

Обычно в суммарных издержках в системе, учитываются как издержки на самой ГЭС, так и по обеспечению регулирующей энергии, необходимой для покрытия графика энергопотребления. Последняя заменяет недоданную энергию, за счет неполного использования расчетных параметров ГЭС. Но так как с увеличением числа ступеней каскада увеличивается суммарная выработка энергии и уменьшается величина неиспользуемой части энергии водотока, и наоборот, при малом числе ступеней размер неиспользуемой энергии за счет местной приточности увеличивается, то для оценки последней правильнее было бы считать ее как недоданную энергию и оценить ее также, как оценивается заменяющая энергия. Тогда принцип минимума издержек в системе выразится формулой:

$$U_c = \sum_{i=1}^n U_i + S_{\text{зам}} \cdot \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i - S_{\text{зам}}^* \cdot \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i^* = \text{минимум} \quad (20)$$

где:  $n$  — число ступеней каскада,

$U_i$  — годовые издержки  $i$ -ой ступени (с учетом тяжести капиталовложений),

$\mathcal{E}_i$  — неиспользованная энергия реки на  $i$ -ой ступени (рис. 5а),

$S_{\text{зам}}$  — стоимость заменяющей энергии качества  $\mathcal{E}_i$ ,

$\mathcal{E}_i^*$  — недоданная энергия  $i$ -ой ступени (необходимая регулирующая энергия) (рис. 5б),

$S_{\text{зам}}^*$  — стоимость заменяющей — регулирующей энергии.

Таким образом, можно задать число ступеней  $n$ , определить соответствующие издержки  $U_c$  и по (20) выбрать оптимальный вариант. В слу-

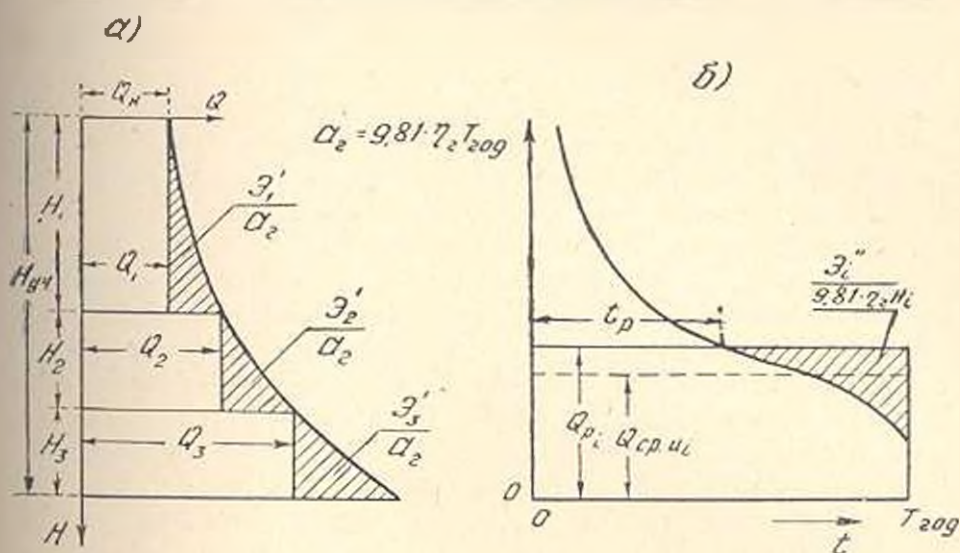


Рис. 5.

чае учета  $H_x$  следует соответствующую неиспользуемую часть энергии также считать недоданной, при чем того же качества, что и энергия  $\mathcal{E}_1$ .

### В ы в о д ы

1. Для энерго-экономического анализа вариантов разбивки падения горной реки на ступени каскада деривационных ГЭС с целью учета энергетических возможностей водотока необходимо составить варианты, отвечающие максимальному энергетическому эффекту (выработка энергии) на каскаде в целом.

При такой разбивке отношение напора каждой ГЭС к общему падению на рассматриваемом участке, зависит от формы напорной характеристики. Оптимальное отношение напоров ступеней для заданного числа ступеней и заданной напорной характеристики можно определить при помощи приведенных в настоящей работе аналитических ф-л или таблиц.

2. В схеме каскада из деривационных ГЭС возможен случай, когда путем отбрасывания некоторой верхней части заданного участка реки и правильной разбивки остальной части, при одном и том же числе ступеней можно получить больший энергетический эффект, чем при использовании всего падения участка. Оптимальная высота отбрасываемой части зависит от параметров напорной характеристики и заданного числа ступеней и определяется аналитическим методом, изложенным в работе.

3. Предлагаемый энергетический метод, в отличие от некоторых существующих методов, исходит из суммарного энергетического эффекта всех ГЭС каскада, на рассматриваемом участке реки при различных числах ступеней каскада. Это дает возможность, при разбивке реки на ступени, более правильно оценивать ее энер-

гетические возможности и варьировать числом ступеней, при составлении вариантов разбивки.

4. Разработанные в настоящей работе методы определения оптимальных напоров деривационных ГЭС могут быть применены для составления рациональных схем использования малых и средних горных рек на предварительной стадии проектирования.

В дальнейших стадиях проектирования такие схемы, составленные для различных чисел ступеней, могут служить в качестве одного из целесообразных вариантов для технико-экономического анализа.

5. Для учета неиспользуемой, вследствие ограниченности числа ступеней, потерянной энергии водотока (энергия за счет приточностей между двумя деривационными ГЭС) предлагается оценивать последнюю по стоимости заменяющей энергии в системе и в расчеты включить ее в состав общих издержек для данного варианта.

Водно-энергетический институт

Поступило 8 XII 1956

АИ Армянской ССР

#### 1. Ա. ԶԻՆԴԱԿԱՆՈՒՆ

### ԼՈՒՆԱՅԻՆ ԳԵՏԵՐԸ ԳԵՐԻՎԱՅԻՈՒՆ ՀԻԳԻՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԿԱՍԿԱԳԻ ԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ԲԱԺԱՆՍԵԼՈՒ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋՐ

#### Ա. մ փ ա փ ու մ

Հոդվածում տրվում է լուծային գետերը չկանոնավորված դերիվացիան հիդրոկայանների կասկադի աստիճանների բաժանման մեթոդ, ելնելով էներգետիկական նպատակահարմարությունից:

Ի տարբերություն զրականության մեջ նայանի նման մեթոդների [3, 4], որտեղ ելնում են ստանձին գիտարկվող հիդրոկայանների մաքսիմում էներգետիկական էֆեկտից (նկ. 1 Ը, Բ), հոդվածում տրվում է աստիճանների այնպիսի բաժանման մեթոդ, որը ելնում է գետի գիտարկվող տեղամասի վրա նախագծվող հիդրոկայանների կասկադի զուամարային մաքսիմում էներգետիկական էֆեկտից (տարեկան էներգիայի մաքսիմում արտադրանք), — ավյալ ապահովվածություն հաշվարկային ելքերի և ցանկացած թվով աստիճանների դեպքում:

Մղղրի մաթեմատիկական լուծման համար նարմար է օգտվել օգտագործվող միջին ելքերի (լուծումն 1) և գետի գիտարկվող տեղամասի անկման բարձրության կապի կարից (լուծումն 3, նկ. 2, 3), իկյ կորով և կոորդինատների ստանդարներով առանձնափոխված մակերևույթ ըստ մասշտաբի համարմեք է գետի հզորությունը (տարեկան էներգիային) ըստ օգտագործվող միջին ելքերի, ելքերի, Սատի ալը կարին ներդրված բազմաստիճան մակերևույթ (նկ. 3-ում զմերով ծածկված), որի աստիճանների չափերը համապատասխանում են կասկադի աստիճանների բարձրություններին և օգտագործվող միջին ելքերին, ըստ մասշտաբի համարմեք է կասկադի հիդրոկայանների զուամարային միջին հզորությունը: Օգտվելով այս զրույթի մաթեմատիկական արտահայտությունից (օր., Լուծումն 5, 8), հնարավոր է կասկադի ցանկացած որոշակի թվով աստիճանների համար որոշել գետի գիտարկվող տե-

զամասի անկման այնպիսի բաժանում (առտիճանների միջև), որի զեպքում հիդրոկայանների գումարային տարեկան էներգիան լինի մաքսիմում: Այդ լուծումը կարելի է հատուրել ինչպես գետի գիտարկվող տեղամասի ամբողջ անկումը օգտագործելով (ինչպես ցույց է տված նկ. 3-ում), այնպես էլ այդ անկման վերին որոշ մասը (նկ. 4) հաշվի չառնելով (որի չափը որոշվում է նույն պայմանից):

Լուծումը ցույց է տալիս, որ նշված կորի (բանաձև 3) ուղղազիծ լինելու զեպքում (նկ. 28, 38) կասկադի ամբողջ նստորրը (տեղամասի անկումը) առանձին հիդրոկայանների միջև բաժանվում է համասար մասերի, բոլոր լինելու զեպքում (նկ. 28, 38, 6) վերին հիդրոկայանների նստորրը ափելի մեծ է ներքիններից. ուսուցիչ լինելու զեպքում (նկ. 26), — բնդհատակը խեղա աղյուսակ №№ 1, 2, 3):

Հողվածում նշված զետեղի էներգետիկական օգտագործման առաջարկվող մեթոդով կազմված սխեմաները կարող են հիմք հանգիստնալ էներգետիկական վերլուծման մեջ, — վերջնական նպատակաւարմար վարիտնալի բնարոթյան համար: Հողվածում արվում է այդ վերլուծման եղանակը, որը հիմնված է էներգետիկական սխեմում միմյանում շահագործման ծախսեր (հաշված և կադիտալ ներդրման ծանրոթյունը) ունենալու հանրահայտ սկզբունքի վրա [1, 2]: Այդ սկզբունքը առաջարկվում է արտահայտել (20) բանաձևով, որտեղ բաղի կասկադի հիդրոկայանների և էներգետիկական սխեմի ծախսերից (բանաձև (20)-ի աջ մասի 1-ին և 3-րդ անդամները, նկ. 36), հաշվի է առնվում նաև գետի չօգտագործվող զորության (էներգիայի) փոխարինման ծախսերը ( (20) բանաձևի աջ մասի 2-րդ անդամը, նկ. 38), որն արվում է տարբեր վարիտնալները մի ընդհանուր էներգետիկական էֆեկտի բերելու համար:

Առաջարկվող մեթոդը կարելի է կիրառել լեռնային գետերի էներգետիկական օգտագործման սխեմաների նախնական նախագծման հաշվարկներում:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Инструкция ВНИИГ. Энергетические расчеты ГЭС. 1945.
2. Инструкция по составлению ТЭД ГЭС. Гидроэнергопроект 1945.
3. Сейфулла Д. О. Анализ энергетического процесса гидроэлектрических станций по особым режимным точкам их характеристик. «Гидротехническое строительство», № 8, 1950.
4. Семенов В. В. Гидроэнергетические основы расчета схемы каскада ГЭС. Труды МЭИ, выпуск XII, 1952.
5. Схема энергоспользования малых рек Армянской ССР для электрификации сельского хозяйства. ВЭНИ АН Армянской ССР, т. I—XIV, 1949 г. (машинпись).