

А. К. Ананян

Потери напора в безнапорных водоводах при плавном расширении потока

В практике гидротехнического строительства очень часто встречаются случаи, когда необходимо осуществить переходы от водовода меньшего поперечного сечения к водоводу большего поперечного сечения. Такие случаи могут иметь место, например, когда поток из тоннеля (меньшего поперечного сечения) переходит в канал (большого поперечного сечения), при выходе потока из различных искусственных сооружений (акведуки, дюкера, сифоны) и т. д. Переходы обычно осуществляются путем плавного расширения водовода.

С точки зрения практики, основным вопросом, подлежащим изучению, является вопрос потерь напора, возникающих при расширении потока. Чем плавнее расширение, т. е. чем меньше угол расхождения перехода при данном соотношении между площадями начального и конечного сечения, тем меньше нарушение плавности потока и тем меньше связанные с этим потери.

Определением потерь напора при расширении жидкости в безнапорных водоводах занимались очень мало (Хиндс). Все исследования в этом направлении велись главным образом для напорных водоводов (Есьман, Буссинеск, Гибсон, Идельчик и т. д.).

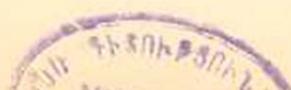
Как бы ни были разнообразны методы исследования, цель у них в конце концов сводилась к уточнению значения коэффициентов потерь (ζ и η) в формулах Борда (1) или Вейсбаха (2):

$$h_w = \zeta \frac{(V_{1cp} - V_{2cp})^2}{2g} \dots \dots (1)$$

$$h_w = \eta \frac{V_{1cp}^2 - V_{2cp}^2}{2g} \dots \dots (2)$$

Необходимо указать, что Борда получил соотношение (1) (без поправочного коэффициента ζ), непосредственно применяя теорему о потере живой силы при ударе неупругих тел.

Применение теоремы неупругого удара к жидкому телу (с осредненными скоростями потока), как известно, не совсем правильно



отражает физическую картину явления. В литературе можно найти соответствующую критику формулы Борда [1,2].*

Если можно (с некоторыми существенными оговорками) согласиться с применением формулы Борда при внезапном расширении водовода (1,2), то будет совсем неправильным сделать то же самое при постепенном расширении водовода. Здесь явление, аналогичное удару неупругих тел, не имеет места и введение Хиндсом в ур. (1) поправочного коэффициента ζ , меняющегося только в зависимости от угла расширения, не полностью учитывает все специфические условия движения жидкости в диффузорах.

Целью настоящей работы является вывод расчетной формулы для определения потерь напора при плавном расширении потока (полный угол расширения до 16°), базируясь в основном на данных опытов, проведенных в 1948 г. в Гидроэлектрической лаборатории (ГЭЛ) Водно-Энергетического Института АН Армянской ССР [3].

1. Основные предпосылки к выводу расчетных формул

Прежде чем перейти к выводу расчетных формул для определения потери напора на расширяющихся участках водоводов, необходимо указать—какие условия были рассмотрены и какие сделаны предположения. Учет этих обстоятельств дает возможность установить—при каких условиях будут справедливы сделанные нами в дальнейшем выводы.

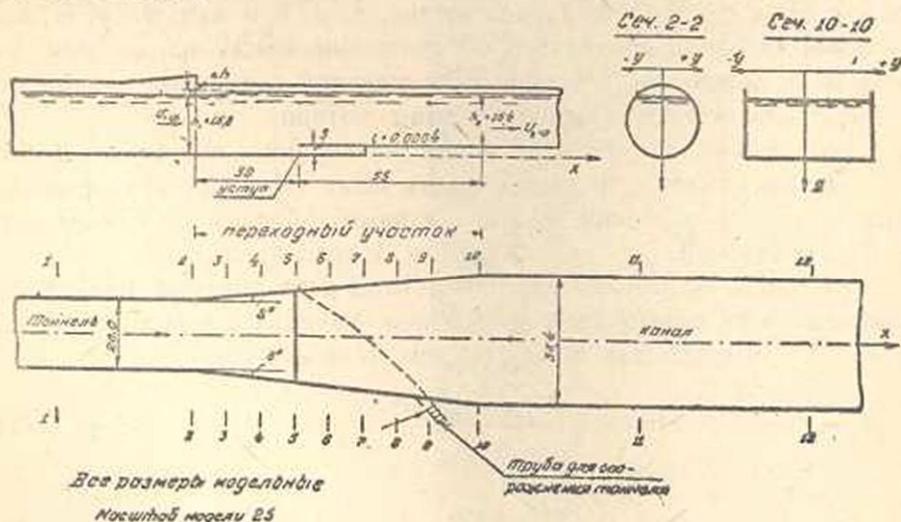


Рис. 1.

Во-первых, мы рассматриваем плавный переход потока (рис. 1) из тоннеля круглого сечения в канал прямоугольного или трапециевидального сечения.

* Исчерпывающая критика дается в Трудах ЦАГИ, № 662—1948 г. Идельчиком И. Е. и в сборнике № 3 ЦАГИ, 1947 г.

На рис. 1 видно, что на дне переходного участка имеется небольшой уступ (недалеко от выходного портала тоннеля), что несколько нарушает плавность расширения потока. Уступ делается в натуре для поднятия трассы канала в связи с восстановлением части кинетической энергии при выходе потока из тоннеля в канал. Уступ несколько углубляется под дно канала при помощи бетонной плиты, что конструктивно облегчает процесс опорожнения тоннеля в случае его ремонта.

Во-вторых, расчетные сечения берутся на границах участка расширяющегося потока (рис. 2).

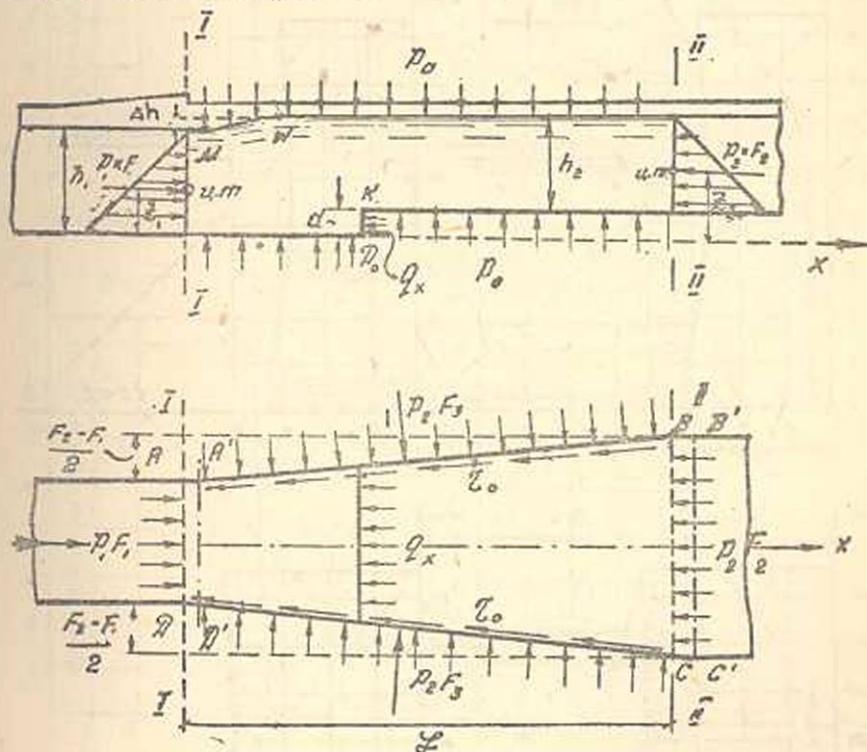


Рис. 2.

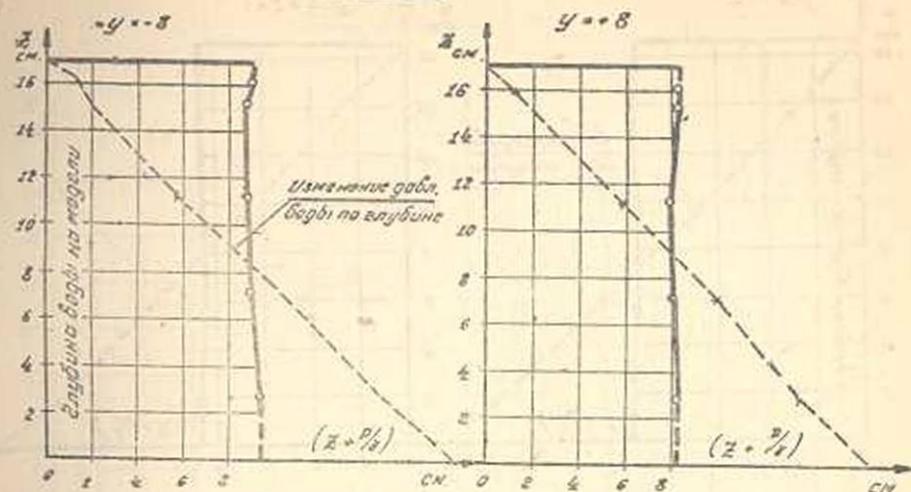
В указанных сечениях струйки жидкости двигаются прямолинейно и параллельно друг к другу, что вполне подтверждается опытами, произведенными в ГЭЛ [3].

В третьих, принимается гидростатический закон распределения давления как по стенкам AB и CD расширяющегося участка водовода, так и в расчетных сечениях перехода (сеч. I—I и II—II, рис. 2).

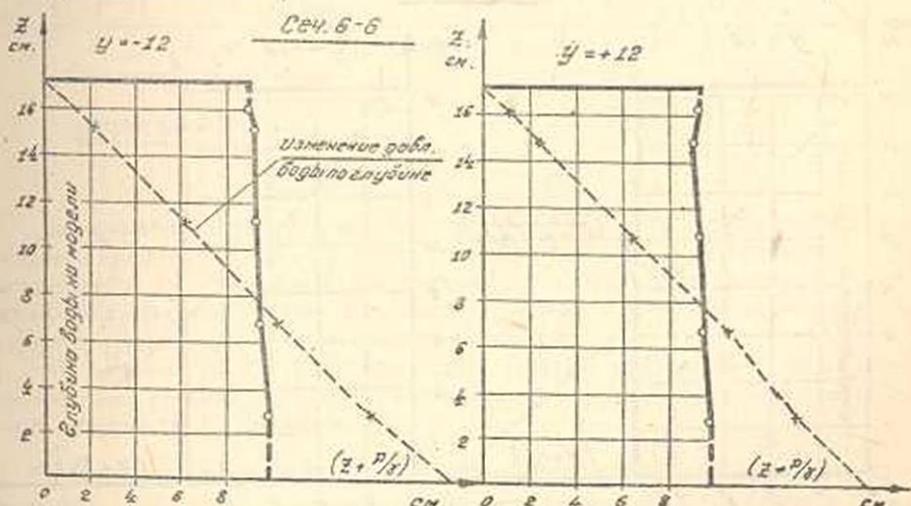
Произведенные в ГЭЛ опыты показали, что при измерении поля скоростей, пьезометрический напор $\left(Z + \frac{P}{\gamma}\right)$ оставался почти постоянным (рис. 3) в пределах каждого сечения перехода.

Из рис. 3 видно, что при полном угле расширения водовода

Сеч. 3-5



гидравлический напор



гидравлический напор

Рис. 3.

лентного потока, что видно непосредственно из прилагаемых эпюр, полученных при исследовании модели деривации ГюмушГЭС (рис. 4).

Как видно из этих эпюр, величины скоростей, измеренные и теоретически подсчитанные, получаются приблизительно одинаковыми, за исключением скоростей непосредственно у поверхности воды. Но ввиду незначительности этой зоны по сравнению с остальными участками эпюр, получаемые при этом ошибки практически не играют роли. Принятые степени $m = \frac{1}{7}$ для сечения I—I и $m = \frac{1}{10}$ для сечения II—II не являются универсальными и могут, вообще говоря, меняться в широких пределах. В ГЭЛ не ставились специальные опыты для установления изменения степени m в зависи-

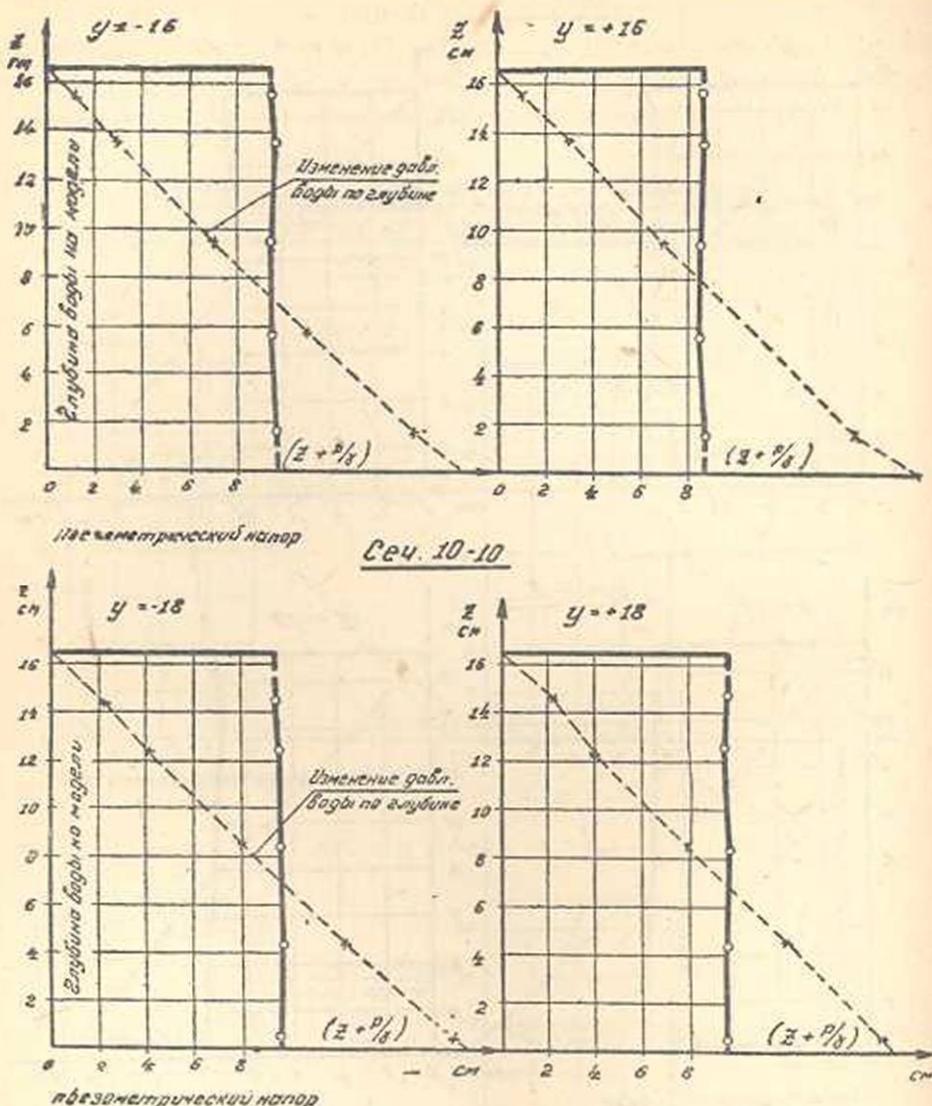


Рис. 3.

мости от угла расширения водовода*. При полных углах расширения водовода до 16° , m может меняться в небольших пределах. Эти изменения не должны заметно отражаться на окончательных результатах теоретического исследования.

В описанных условиях становится вполне законным и возможным применение уравнения количества движения и дополнительно уравнения баланса полных мощностей потока при определении потери напора в плавно расширяющихся переходах.

При выводе расчетных формул мы отказались от применения понятия средней скорости потока.

* Соответствующие опыты будут поставлены в ближайшее время.

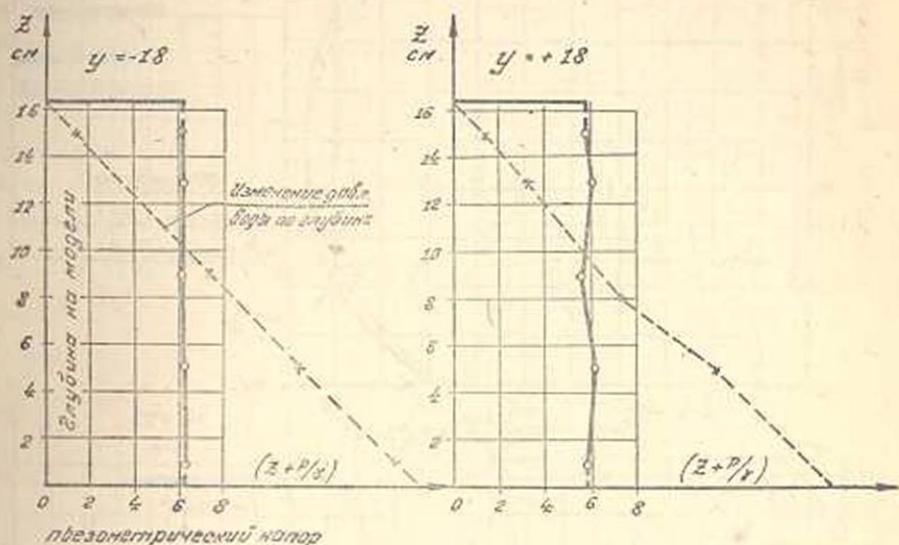
Сеч. 12-12Примечание

Рис. 3.

В процессе измерения пьезометрического давления трубка Ребока перемещалась вдоль оси y -ов по всему сечению. При этом горизонт воды в статической трубке держался почти неизменным, что давало возможность ограничиваться показанием на приведенных выше графиках пьезометрического давления в зонах, расположенных ближе к стенкам водовода.

В сечениях 1—1, 12—12 абсолютное значение пьезометрического давления отличается от таковой в остальных сечениях, так как вакуум в манометре был изменен в процессе исследования.

Определение потери напора по осредненным скоростям принципиально неверно, так как кинетическая энергия потока с неравномерным распределением скоростей больше энергии потока, определяемой по средней скорости [2].

Расширение сечения водовода, даже если оно незначительное, все же влияет на распределение скоростей. При этом профили скоростей становятся более выпуклыми (остроконечными) в конце переходного участка (сечения II—II), по сравнению с эпюрами скоростей в сечении 1—1.

Потери напора при расширении потока складываются из потерь, вызванных трением потока о стенки и дно и дополнительных потерь, вызванных формой переходного участка.

Для определения величины потери удельной энергии (напора), имеющей место вследствие постепенного расширения (потери, обусловленные формой переходного участка), воспользуемся уравнением изменения количества движения и дополнительно уравнением балан-

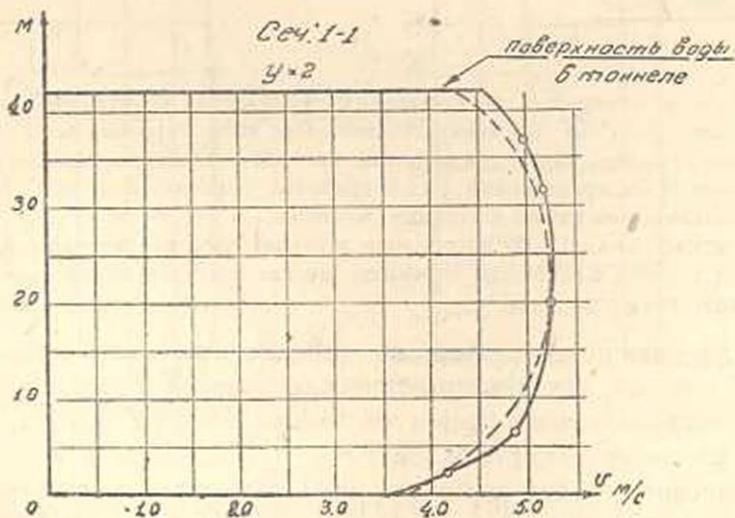
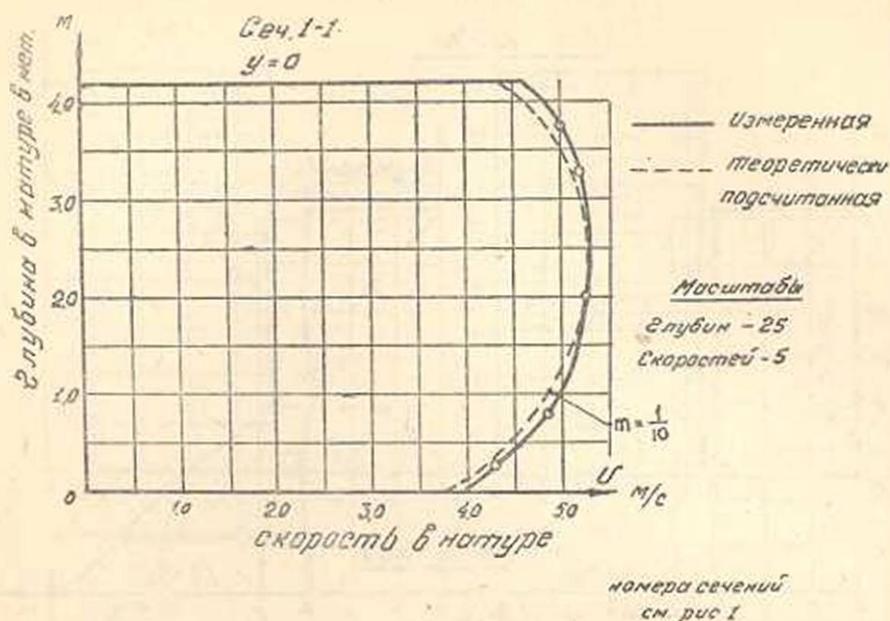


Рис. 4.

са полных мощностей потока с учетом, при этом, неравномерности распределения скоростей в сечениях I—I и II—II.

2. Вывод расчетной формулы для потери напора при расширении потока

Мысленно выделим из потока объем ABCD (рис. 2) и приложим к нему реакции отбрасываемой жидкости, а также стенок и дна лотка, и составим уравнение изменения количества движения.

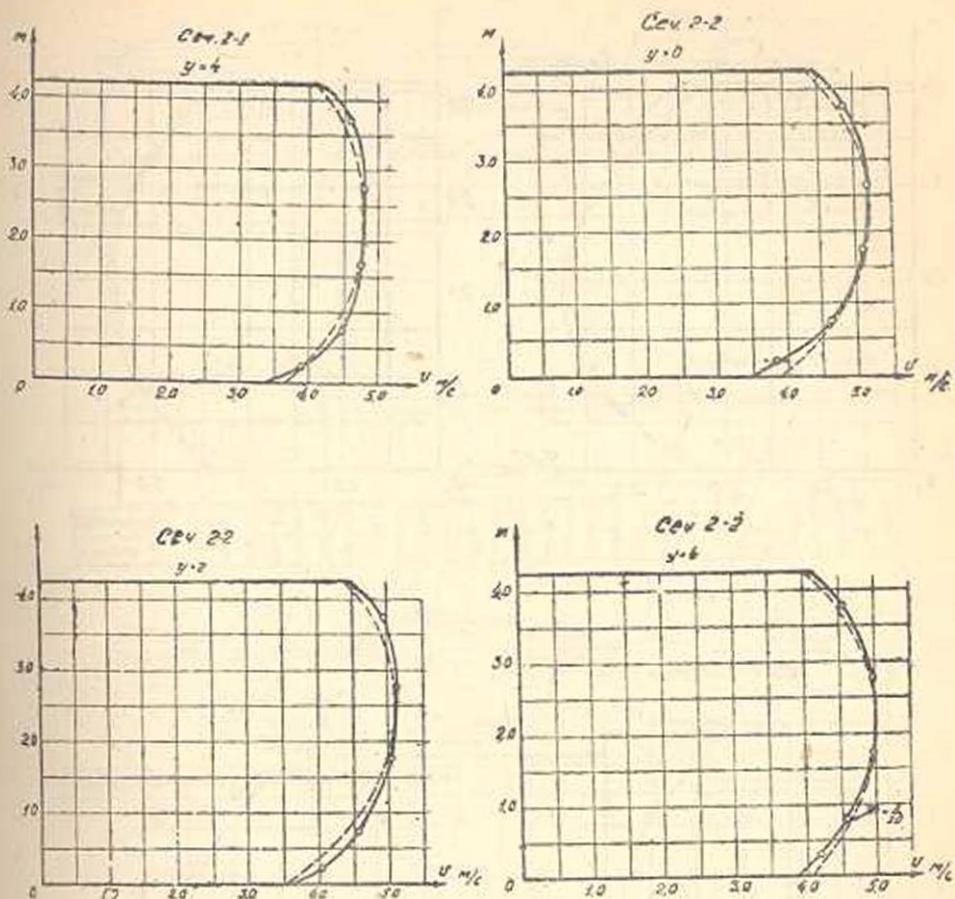


Рис. 4.

Действующие силы следующие:

1. Реакции мысленно отбрасываемых стенок и дна. Эти реакции сводятся к двум категориям поверхностных сил, а именно:

а) нормальные силы давления, действующие в точках смоченной поверхности стенок и дна,

б) силы внутреннего трения между стенками и потоком. Эти силы в случае прямолинейно-параллельного движения жидкости представляют из себя касательные напряжения в точках поверхности дна и боковых стенок и направлены против течения жидкости. В случае расходящегося потока эти напряжения сил трения состоят из нормальных и касательных напряжений, тесно связанных между собой и приложенных в точках смоченной поверхности стенок и дна. Для учета сил трения пока не существует единого метода.

2. Силы давления в сечении I—I и II—II.

3. Силы тяжести.

Суммарное давление на боковые стенки АВ и CD и на уступ дна KD₀ (рис. 1 и 2) равно давлению в центре тяжести каждой поверхности, умноженному на величину соответствующих площадей.

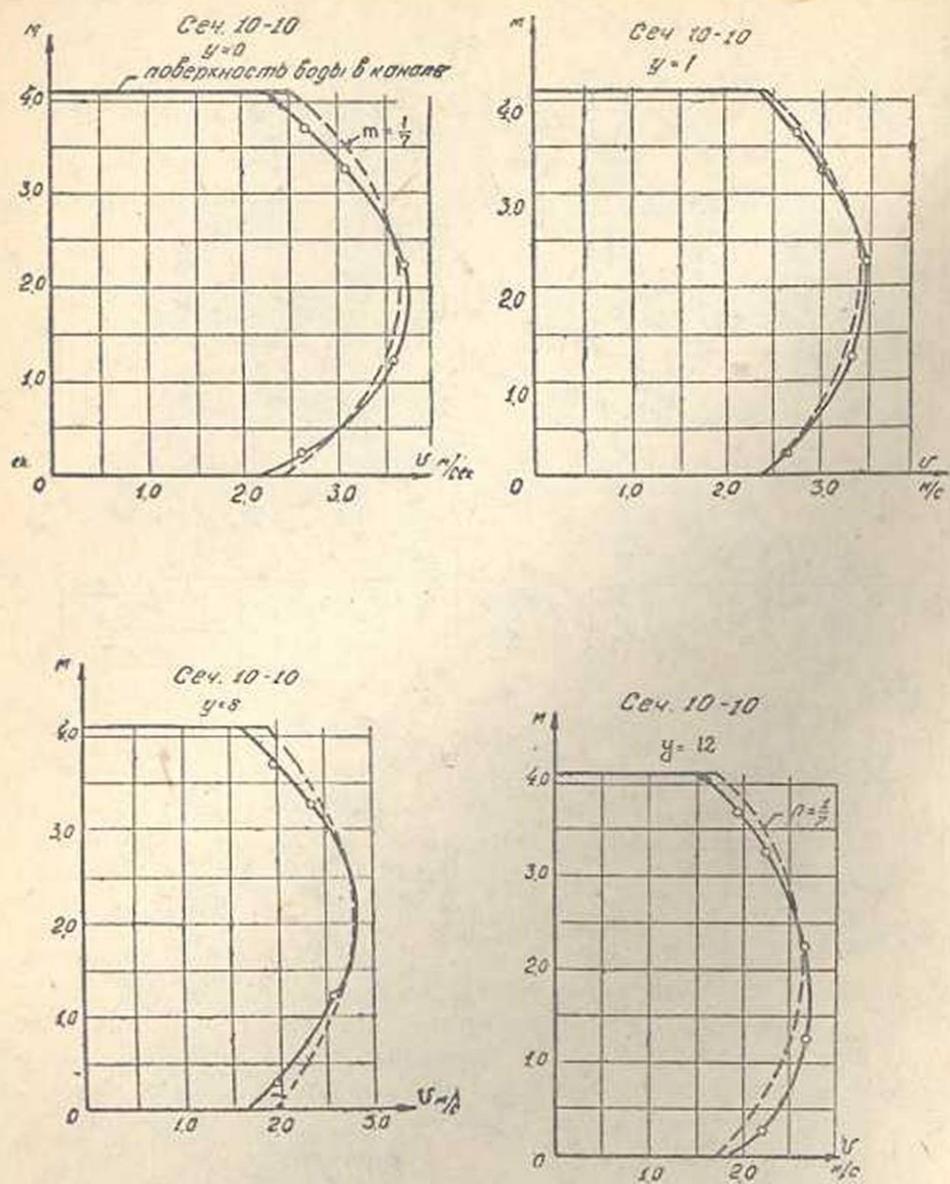


Рис. 4.

Давление в центре тяжести поверхности АВ и CD принимается равным давлению в центре тяжести сечения II—II, так как поверхность воды на переходном участке почти параллельна дну водовода. На рис. 5 приведены результаты экспериментальных исследований вида свободной поверхности жидкости по длине перехода. Как видно из рисунка, за исключением небольшого участка, поверхность воды на остальном протяжении (95% от всей длины перехода) остается параллельной дну водовода.

Точный учет давления на вышеуказанном небольшом участке MW контура (рис. 2) требует знания кривой свободной поверхности.

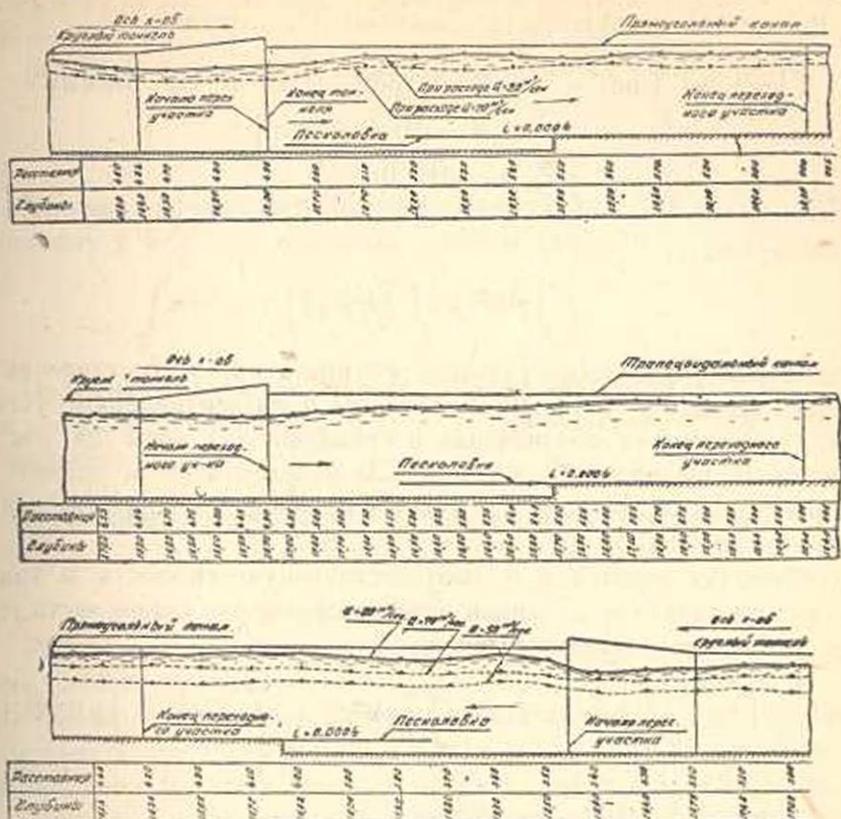


Рис. 5.

Для упрощения будем считать, что глубина на участке MW равна глубине в сечении II—II.*

Суммарное давление на стенку вертикального уступа определяется по гидростатическому закону в силу тех конструктивных особенностей, которые были указаны в § 1, п. 1.

Проекция собственного веса объема жидкости между сечениями I—I и II—II учитывается, если дно русла не горизонтально. Уклон дна исследованных переходных участков $i = 0,0004$.

Направляя ось x -ов по оси симметрии водовода, как показано на рис. 1 и 2, переходим к составлению уравнения количества движения. Приращение проекции на данную ось ($x-x$) количества движения рассматриваемого отсека равно проекции на ту же ось импульса всех внешних сил, приложенных в точках внутри отсека и в точках поверхности, ограничивающей отсек.

$$\left\{ \int_{V_2} V \, dm - \int V \, dm \right\} dt = \Sigma \int p \, dt \quad \dots \quad (3)$$

* При нормальном наполнении тоннеля в сечениях I—I и II—II глубины h_1 и h_2 незначительно отличаются друг от друга (рис. 1 и 5).

Раскрывая правую часть уравнения (3), получим:

$$\Sigma \int p dt = \left\{ \int_{F_1} p dF - \int_{F_2} p dF + 2 \int_{F_1} p dF - \int_{F_2} p dF + \int_L G_x \cdot \sin \alpha dx - \int_L \tau_0 \cdot z_{cp} \cdot dx \right\} dt \quad \dots \quad (4),$$

где интегралы

$$2 \int_{F_1} p dF \text{ и } \int_{F_2} p dF$$

соответственно выражают реакции гидростатического давления на боковые поверхности АВ и CD водовода и на вертикальные уступы дна КD₀. Остальные обозначения в уравнении (4) ясны из рис. 2. За время dt, выделенный объем ABCD переместится и займет положение A'B'C'D', то-есть произойдет изменение количества движения в объеме ABCD.

Обозначая через V и p соответствующую скорость и гидростатическое давление в данной точке, выражение левой части уравнения (3) можно написать в виде:

$$\int_{F_1} V dm - \int_{F_2} V dm = \int_{F_1} \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 dm - \int_{F_2} \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 dF = \int_{F_1} \rho V^2 dF - \int_{F_2} \rho V^2 dF \quad (5),$$

$$\text{где } dm = \frac{\gamma}{g} \cdot V dF = \rho \cdot V \cdot dF$$

Разность интегралов правой части уравнения (5) выражает приращение секундного количества движения, выделенного объема жидкости.

В уравнении (3) время dt можно считать равным единице, так как движение жидкости установившееся.

Подставляя уравнения (4) и (5) в уравнение (3), получим:

$$\int_{F_1} \rho V^2 dF - \int_{F_2} \rho V^2 dF = \int_{F_1} p dF - \int_{F_2} p dF + 2 \int_{F_1} p dF - \int_{F_2} p dF + \int_L G_x \cdot \sin \alpha dx - \int_L \tau_0 \cdot z_{cp} \cdot dx \quad \dots \quad (6)$$

Рассмотрим в отдельности каждый интеграл, входящий в уравнение (6).

Величина суммарного давления в сечениях I—I и II—II будет:

$$\int_{F_1} p dF = P_1 F_1 \quad \dots \quad (7)$$

$$\int_{F_2} p dF = P_2 F_2 \quad \dots \quad (8),$$

где P_1 и P_2 соответствующие давления в центрах тяжести сечения F_1 и F_2 (рис. 2).

Величина суммарного давления на боковые стенки [4] [5]:

$$2 \int_{F_1} p dF \approx P_2 (F_2 - F_1) \quad \dots \quad (9)$$

Величина суммарного давления на вертикальный уступ согласно сказанному в § 2, п. 1 принимаем равным (рис. 2):

$$\int_{F_1} p dF = \gamma \left(h_2 + \frac{d}{2} \right) F_1 = P_2 \quad \dots \quad (10)$$

Проекция собственного веса объема жидкости ABCD на ось x -ов, согласно сказанному в § 2, п. 1, приближенно можно считать по формуле:

$$\int_{\alpha} G_x \sin \alpha \cdot dx = \gamma \frac{F_1 + F_2}{2} \cdot L \cdot \sin \alpha = \gamma F_{cp} \cdot L \cdot \sin \alpha = G_x^* \quad (11)$$

где α — угол наклона дна водовода.

Рассматривая поток между двумя бесконечно близкими сечениями, обычно принимают, что горизонтальная проекция суммарной силы трения в точках этой элементарной полоски по контуру стенок и дна будет такого же порядка, как в соответствующем равномерном движении. Другими словами, проекция на ось x суммы сил трения, действующих в точках указанной элементарной полоски, равна

$$dT_x = \tau_0 \cdot x \cdot dx = \gamma \frac{V^2}{C^2} \cdot x \cdot dx \quad \dots \quad (12)$$

Согласно этому допущению горизонтальная проекция суммарной силы трения для данного отсека равна

$$T_x = \int_L \gamma \frac{V^2}{C^2} x \cdot dx \quad \dots \quad (13)$$

Для вычисления этого интеграла необходимо знать зависимость смоченного периметра и коэффициента Шези от координаты x .

Так как свободная поверхность на переходном участке почти параллельна дну (рис. 5), то интеграл (13) можно выражать следующим образом:

$$T_x = \int \gamma \frac{V^2}{C^2} x \cdot dx \approx \frac{V_{cp}^2}{C_{cp}^2} \cdot x_{cp} \cdot L \cdot \gamma \quad \dots \quad (14)$$

Необходимо указать, что замена интеграла левой части уравнения (12) формулой Шези условна, так как формула Шези, как известно, выражает полную потерю энергии потока на единицу длины водовода (полная потерянная энергия складывается из потерь на внутренние и внешние сопротивления).

При составлении уравнения изменения количества движения сумму проекций внутренних сил нужно считать равной нулю. Следовательно, правая часть выражения (12) целиком относится к внешним потерям. В этом и заключается некоторая условность замены интеграла (12) формулой Шези.

«В обычном параллельно-струйном потоке основные потери энергии по длине потока приурочиваются к области соприкосновения потока с его твердыми стенками, т. е. к его смоченному периметру: во всей массе потока образование местных завихрений и соответствующие потери энергии при указанном характере движения, повидимому, практически не играют роли» [6, стр. 138].

Уравнение (6) с учетом уравнений 7—14 примет вид:

$$P_1 F_1 - P_2 F_2 + P_2 (F_2 - F_1) - P_x + G_x^* - T_x = \int_{F_1} \rho V^2 dF - \int_{F_1} \rho V_2 dF,$$

откуда

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{F_1} \left\{ \int_{F_2} \rho V^2 dF - \int_{F_1} \rho V^2 dF \right\} + \frac{q_x - G_x^* + T_x}{F_1} \dots (15).$$

Чтобы найти выражение для потери напора в рассматриваемом расходящемся участке потока, достаточно написать уравнение Бернулли для центров тяжести начального и конечного сечения потока и решить это уравнение совместно с уравнением (15). Учитывая необходимость совместного решения этих уравнений, удобно все члены уравнения Бернулли умножить на постоянную величину весового расхода в сечении потока, то-есть написать уравнение баланса полных мощностей в начальном и конечном сечении отсека потока.

$$\int_{F_1} \left(Z_1 + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \right) \gamma V \cdot dF - \int_{F_1} \left(Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \right) \cdot \gamma \cdot V \cdot dF = \Delta E, (16)$$

где ΔE — потерянная энергия.

Так как произведенные в ГЭЛ опыты показали, что пьезометрический напор $\left(Z + \frac{P}{\gamma} \right)$ остается постоянным в пределах каждого сечения (рис. 3) и поскольку из уравнения количества движения определены разности давлений в центрах тяжести сечения I—I и II—II, то в уравнении (16) пьезометрические напоры берутся не произвольно, а в центре тяжести соответствующих сечений F_1 и F_2 , т. е.

$$\begin{aligned} \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \right) \cdot \gamma \int_{F_1} V dF - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right) \cdot \gamma \int_{F_2} V \cdot dF = \Delta E + \int_{F_2} \frac{\gamma}{2g} V^3 \cdot dF - \\ - \int_{F_1} \frac{\gamma}{2g} V^3 \cdot dF \dots (17) \end{aligned}$$

После введения несложных преобразований в уравнение (17) находим:

$$P_1 - P_2 = \frac{\Delta E}{Q} + \frac{1}{Q} \left\{ \int \rho \frac{V^3}{2} dF - \int \rho \frac{V^3}{2} dF \right\} + \gamma (Z_2 - Z_1) \dots (18).$$

Отношение $\frac{\Delta E}{Q}$ выражает удельную энергию, потерянную на расширение потока. Его, для краткости, обозначаем буквой

$$h_{\text{пот.}} = \frac{\Delta E}{Q} \frac{\text{тонн}}{\text{м}^2}$$

Приравняв друг другу правые части уравнения (15) и (18), находим общее выражение для $h_{\text{пот.}}$

$$h_{\text{пот.}} = \frac{1}{F_1} \left\{ \int_{F_1} \rho V^3 dF - \int_{F_1} \rho V^3 dF \right\} + \frac{P_x - G_x + T_x}{F_1} - \frac{1}{Q} \left\{ \int_{F_1} \rho \frac{V^3}{2} dF - \int_{F_1} \rho \frac{V^3}{2} dF \right\} - \gamma (Z_2 - Z_1) \quad (19)$$

Переходим к раскрытию интегралов в условиях частного примера модели деривации ГЭС. Произведенные в большом количестве замеры скоростей дают возможность установить степенной закон распределения скоростей по вертикали в канале прямоугольного сечения (сечения II-II рис. 4).

$$V = V_{2\text{max.}} \left(\frac{H-y}{H} \right)^{1/2} = V_{2\text{max.}} \left(1 - \frac{y}{H} \right)^{1/2} \quad (20).$$

Для туннеля (сечение I-I)

$$V = V_{1\text{max.}} \left(\frac{r-y}{r} \right)^{1/10} = V_{1\text{max.}} \left(1 - \frac{y}{r} \right)^{1/10} \quad (21).$$

Обозначения, входящие в уравнение (20) и (21), показаны на рис. 6 и 7

$$\int_{F_1} \rho V^3 \cdot dF = 2\rho \int_0^H V_{2\text{max.}}^3 \left(1 - \frac{y}{H} \right)^{3/2} \cdot b \cdot dy = -$$

$$- 2\rho H \cdot b \cdot V_{2\text{max.}}^3 \int_0^1 \left(1 - \frac{y}{H} \right)^{3/2} d \left(1 - \frac{y}{H} \right) = \frac{14}{9} \rho V_{2\text{max.}}^3 \cdot b \cdot H. \quad (22).$$

Так как $2 b \cdot H = F_2$, следовательно

$$\int_{F_1} \rho V^3 \cdot dF = \frac{7}{9} \rho V_{2\text{max.}}^3 \cdot F_2 \quad (23).$$

$$\int_{F_i} \rho V^2 dF = \int \rho V_{1\max}^2 \left(\frac{r-y}{r} \right)^{2/10} \cdot 2 \sqrt{r^2 - y^2} \cdot dy$$

где

$$dF = 2 \sqrt{r^2 - y^2} \cdot dy$$

Обозначения ясны из рис. 7.

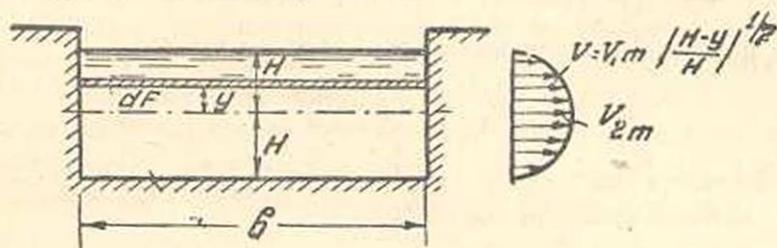


Рис. 6.

$$\int_{F_i} \rho V^2 \cdot dF = 2\rho V_{1\max}^2 r \int \left(1 - \frac{y}{r} \right)^{1/5} \left(1 - \frac{y^2}{r^2} \right)^{1/2} \cdot dy \quad (24)$$

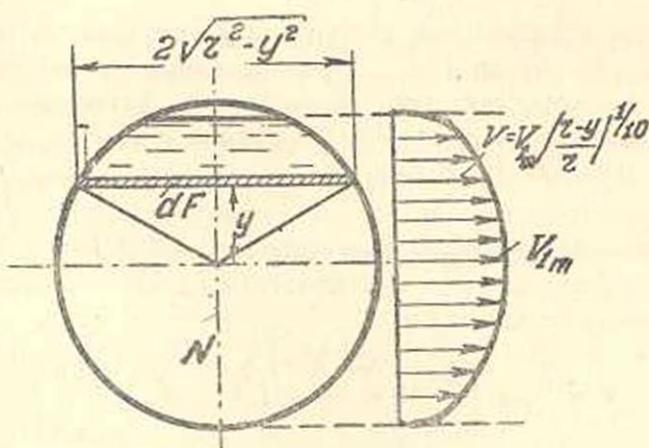


Рис. 7.

Подинтегральное выражение уравнения (24) приведено к более удобному виду путем подстановки

$$x = 1 - \frac{y}{r} \quad dy = -rdx$$

$$\begin{aligned} \int_{F_i} \rho V^2 dF &= -2\rho V_{1\max}^2 r^2 \int \left[x^{7/10} (2-x)^{1/2} \right] dx = - \\ &= 2,84 \rho V_{1\max}^2 r^2 \int x^{7/10} \left(1 - \frac{x}{2} \right)^{1/2} \cdot dx \end{aligned} \quad (25)$$

Интеграл уравнения (26) приводится к виду

$$\int x^m (a - bx^n)^p dx,$$

который в данном случае нельзя выразить через алгебраические и тригонометрические функции в конечном виде, так как $\frac{m+1}{n}$, p , $\frac{m+1}{n} + p$ не есть целые числа. Следовательно, этот интеграл можно раскрыть приближенно; для этого выражения (25) раскладываем в ряд и ограничиваемся его третьим членом, а именно:

$$\left(1 - \frac{x}{2}\right)^{1/2} = 1 - \frac{x}{4} - \frac{x^2}{32} \dots$$

Для исследованных моделей нормальное расчетное наполнение тоннеля составляет 90% от общей площади; поэтому интеграл (25) разбиваем на два интеграла с различными пределами интегрирования:

$$\int_0^1 \left[x^{7/10} \left(1 - \frac{x}{4} - \frac{x^2}{32}\right) dx + \int_0^{0,25} \left[x^{7/10} \left(1 - \frac{x}{4} - \frac{x^2}{32}\right) dx = -0,897 \right. \quad (26).$$

$$\int_{F_1} \rho V^3 dF = 2,84 \rho V_{1\max}^2 r^2 \cdot 0,897 = 0,81 \rho V_{1\max}^2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (27).$$

Раскрываем остальные интегралы выражения (19)

$$\int_{F_1} \rho \frac{V^3}{2} dF = \rho V_{2\max}^3 \cdot \int_0^1 \left(1 - \frac{y}{H}\right)^{3/7} \cdot b \cdot dy \quad (28).$$

Произведя интегрирование аналогично (22)–(26), получим:

$$\int_{F_2} \rho \cdot \frac{V^3}{2} dF = \frac{7}{20} V_{2\max}^3 \cdot \rho \quad (29).$$

$$\begin{aligned} \int_{F_1} \rho \frac{V^3}{2} dF &= \rho \frac{V_{1\max}^3}{2} \int \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{3/10} \cdot 2 \sqrt{r^2 - y^2} \cdot dy = \\ &= \rho \cdot V_{1\max}^3 \cdot r^2 \int \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{3/10} \left(1 - \frac{y^2}{r^2}\right)^{1/2} \cdot dy \end{aligned}$$

Произведя интегрирование аналогично (25), получим:

$$\begin{aligned} \int_{F_1} \rho \frac{V^3}{2} dF &= -1,42 \rho V_{1\max}^3 r^2 \left\{ \int_0^1 x^{7/10} \left(1 - \frac{x}{4} - \frac{x^2}{32}\right) dx + \right. \\ &\left. + \int_0^{0,25} x^{8/10} \left(1 - \frac{x}{4} - \frac{x^2}{32}\right) dx \right\} = 0,372 V_{1\max}^3 \rho \pi r^2 \quad (30) \end{aligned}$$

Подставив значение интегралов (23), (27), (29) и (30) в уравнение (10), получим:

$$h_{\text{пот.}} = \frac{1}{F_1} \left\{ 0,777 \rho V_{2\text{max.}}^2 F_2 - 0,81 \rho V_{1\text{max.}}^2 F_1 + P_x - G_x^0 + T_x \right\} - \frac{1}{Q} \left\{ 0,35 \rho V_{2\text{max.}}^3 \cdot F_2 - 0,372 V_{1\text{max.}}^3 \cdot \rho F_1 \right\} - \gamma(Z_2 - Z_1)$$

или

$$h_{\text{пот.}} = 0,777 \rho V_{2\text{max.}}^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 0,81 \rho V_{1\text{max.}}^2 - 0,35 \rho V_{2\text{max.}}^3 \cdot \frac{F_2}{Q} + 0,372 V_{1\text{max.}}^3 \cdot \rho \cdot \frac{F_1}{Q} + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1} - \gamma(Z_2 - Z_1), \quad (31),$$

где $h_{\text{пот.}}$ — удельная энергия, потерянная на расширение потока тонн/м²,

$V_{2\text{max.}}$ — минимальная скорость в сечении II—II,

$V_{2\text{max.}} = 1,15 V_{1\text{ср.}}$,

$V_{1\text{max.}}$ — максимальная скорость в сечении I—I,

$V_{1\text{max.}} = 1,10 V_{1\text{ср.}}$,

F_1 — площадь живого сечения I—I,

F_2 — площадь живого сечения II—II,

Q — расход жидкости,

G_x^0 — проекция веса выделенного отсека жидкости на оси x,

P_x — проекция на ось x-ов реакции давления на вертикальный

уступ дна,

T_x — проекция силы трения на ось x-ов.

Z_1 и Z_2 — соответственно ординаты центров тяжести сечений I—I и II—II, считая от оси x-ов (геометрическая высота центров тяжести над плоскостью сравнения).

Таким образом, все члены, входящие в правую часть уравнения (31), являются известными величинами, что дает возможность без экспериментов довольно точно подсчитать величину $h_{\text{пот.}}$

В уравнении (31) учтены все основные факторы, обуславливающие потерю удельной энергии при расширении потока. Эти факторы следующие: неравномерность распределения скоростей (обусловленная углом расхождения перехода и формой расширения потока), силы трения о стенки и дно перехода, реакция уступа, вызванная гидростатическим давлением на него, глубина наполнения, расход жидкости и т. д.

Из уравнения 31 легко определяется безразмерный коэффициент потери удельной энергии ξ_0 .

* Коэффициенты получены на основании многочисленных замеров поля скоростей в расчетных сечениях перехода и сохраняют постоянную величину при довольно больших числах Рейнольдса.

Прежде чем перейти к выводу коэффициента потерь удельной энергии потока, необходимо указать, что численные значения этого коэффициента будут разные, в зависимости от того — к какой скорости он относится. Конечно, при этом величина потерь напора, вычисленная по тому или другому коэффициенту ξ , будет одной и той же, так как кинетическая энергия потока в этом случае берется в соответствующих расчетных сечениях (формула 36).

Если отнести потери удельной энергии ($h_{пот.}$) к максимальному скоростному напору (т. е. к скоростному напору в тоннеле (сечение I—I), то выражение искомого коэффициента ξ_0 будет равно:

$$\xi_0 = \frac{0,777 \rho V_{2max}^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 0,81 \rho V_{1max}^2 - 0,35 \rho V_{2max}^3 \cdot \frac{F_2}{Q} + 0,372 \rho V_{1max}^3 \cdot \frac{F_1}{Q} + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1} - \gamma(Z_2 - Z_1)}{\rho \cdot \frac{V_{1max}^2}{2}} \quad (33).$$

После ряда простых преобразований получается окончательное выражение для коэффициента потерь напора, отнесенного к максимальному скоростному напору (сеч. I—I):

$$\xi_0 = 1,56 \left(\frac{V_{2max}}{V_{1max}} \right)^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 1,62 - 0,7 \left(\frac{V_{2max}^3}{V_{1max}^3} \right) \cdot \frac{F_2}{Q} + 0,74 \cdot V_{1max} \cdot \frac{F_1}{Q} + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1 \rho \cdot \frac{V_{1max}^2}{2}} - \frac{\gamma(Z_2 - Z_1)}{\rho \frac{V_{1max}^2}{2}} \quad (34).$$

Аналогичным образом можно найти выражение коэффициента потерь удельной энергии напора, отнесенного к разности максимальных скоростных напоров в сечениях I—I и II—II.

Как видно, выражение для коэффициента потерь имеет более сложный вид, чем по формуле Борда или Вейсбаха (уравнения 1 и 2). Действительно, из выражения (34) видно, что коэффициент ξ_0 зависит от: 1) соотношения выходных (сеч. I—I) и входных (сеч. II—II) площадей, 2) от неравномерности распределения скоростей, 3) от глубины наполнения и расхода жидкости, 4) от сил трения и от величины проекции силы тяжести на ось x-ов и, наконец, 5) от высоты уступа. Последнее обстоятельство играет существенную роль в создании потери напора. Влияния этого уступа нельзя было учесть существующими в настоящее время методами расчета.

При коротких переходах (с незначительным уклоном дна), си-

лами трения и силами тяжести можно пренебречь. Тогда уравнение 34 несколько упростится и примет вид:

$$\xi_0 = 1,56 \left(\frac{V_{2\max.}}{V_{1\max.}} \right)^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 1,62 - 0,7 \left(\frac{V_{2\max.}^3}{V_{1\max.}^3} \right) \frac{F_2}{Q} + 0,74 \cdot V_{1\max.} \cdot \frac{F_1}{Q} +$$

$$+ \frac{P_x}{F_1 \rho \frac{V_{1\max.}^2}{2}} - \frac{\gamma(Z_2 - Z_1)}{\rho \cdot \frac{V_{1\max.}^2}{2}} \quad (35).$$

При наличии длинных переходных участков пренебречь указанными выше силами нельзя и коэффициент ξ_0 надо определять по формуле (34).

Зная величину коэффициента потерь ξ_0 (из уравнения 34), легко вычислить потери напора при расширении потока, пользуясь формулой

$$h_w = \xi_0 \cdot \frac{V_{1\max.}^2}{2g} \quad (36).$$

Значение потери напора можно вычислять и по формуле (31) без предварительного вычисления коэффициента потерь ξ_0 , как это обычно принято считать на практике. Для этого достаточно все члены уравнения потери удельной энергии потока (31) разделить на объемный вес жидкости, т. е.:

$$h_w = 0,777 \frac{V_{2\max.}^2}{g} \frac{F_2}{F_1} - 0,81 \frac{V_{1\max.}^2}{g} - 0,35 \frac{V_{2\max.}^3}{g} \frac{F_2}{Q} + 0,372 \frac{V_{1\max.}^3}{g} \frac{F_1}{Q} +$$

$$+ \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{\gamma F_1} - (Z_2 - Z_1) \quad (37),$$

где $h_w = \frac{h_{\text{пот.}}}{\gamma}$ (метр) есть потеря напора при расширении потока.

Полученные выражения (34) и (37) не только правильно отражают физическую сущность потерь напора, но и более универсальны, чем формулы 1 и 2. По формулам (34) и (37) можно определять потери в тех случаях, когда выходные (сеч. I—I) и входные (сеч. II—II) средние скорости потока равны друг другу. По формуле Борда и Вейсбаха (ур. 1 и 2) потери напора в этом случае получаются равными нулю (так как $V_{1cp} = V_{2cp}$), что не наблюдается на практике. По этому поводу можно найти указания в журнале „Гидротехническое строительство“ № 11, 1936: „Потери напора, вызываемые переменной формы поперечного сечения канала без изменения площади этого сечения имеют место, что не поддается учету существующими методами расчетов“*.

* Правда, эти потери иногда могут быть и незначительными, в зависимости от степени неравномерности распределения скоростей в потоке.

Очень часто в практике лабораторных исследований значения коэффициентов потерь напора при плавном расширении потока определяются из уравнения Бернулли (рис. 2):

$$h_1 + \frac{\alpha_1 V_{1cp}^2}{2g} = d + h_2 + \frac{\alpha_2 V_{2cp}^2}{2g} + h_w, \quad (38)$$

где h_w — суммарные потери напора на трение по длине перехода и на местные сопротивления. Приближенное значение h_w можно опре-

делить по формуле $h_w = \xi \frac{\alpha_1 V_{1cp}^2}{2g} + h_e$, где h_e — потери напора на трение, определяемые по формуле Шези:

$$h_e = \frac{V_{cp}^2 \cdot L}{C_{cp}^2 \cdot R_{cp}}$$

После простых преобразований уравнения (38) найдем выражение для коэффициента потерь напора, отнесенного к среднему скоростному напору в тоннеле:

$$\xi = 1 - \frac{\frac{\alpha_2 V_{2cp}^2}{2g} + \Delta h + h_e}{\frac{\alpha_1 V_{1cp}^2}{2g}} \quad (39)$$

Значения входящих в формулу (39) величин ясны из рис. 2. В ГЭЛ были произведены подробные гидравлические исследования по определению коэффициента потерь при плавном расширении потока, пользуясь формулой (39).

Для сопоставления результатов подсчетов, произведенных по формулам 34, 36 и 39, решим один пример (данные соответствуют одному из опытов ГЭЛ)

$$Q = 80 \text{ м}^3/\text{сек.}, F_1 = 17,8 \text{ м}^2, F_2 = 39 \text{ м}^2, L = 22 \text{ м.}$$

$$h_1 = 4,20, h_2 = 4,10, \text{ высота уступа } d = 0,76 \text{ м.}$$

$$\text{Из эпюры скоростей } V_{2\text{max.}} = 2,3 \text{ м/сек. } V_{1\text{max.}} = 4,9 \text{ м/сек.}$$

Для определения коэффициента потерь ξ_0 (по формуле 34) необходимо вычислять:

1) проекцию на ось x -ов реакции, вызванной гидростатическим давлением на вертикальный уступ дна по формуле 10 (рис. 2):

$$P_x = \gamma \left(h_2 + \frac{d^2}{2} \right) \cdot F_2 = 22,2 \text{ тонны};$$

2) проекцию на ось x -ов веса выделанного отсека жидкости по формуле (11):

$$G_x^0 = \gamma \cdot L \cdot F_{cp} \cdot \sin \alpha = 0,4 \text{ тонны};$$

3) проекцию на ось x -ов силы трения по формуле (19):

$$T_x = \frac{V_{\text{ср}}^2}{C_{\text{ср}}} \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot L \cdot \gamma = 1,0 \text{ тонне.}$$

По формуле 34 определены коэффициенты потерь напора:

$$\xi_0 = 1,56 \left(\frac{V_{2\text{max.}}}{V_{1\text{max.}}} \right)^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 1,62 - 0,7 \left(\frac{V_{2\text{max.}}}{V_{1\text{max.}}} \right) \frac{F_2}{Q} + 0,74 V_{1\text{max.}} \cdot \frac{F_1}{Q} + \\ + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1 \cdot \rho \cdot \frac{V_{1\text{max.}}^2}{2}} - \frac{\gamma(Z_2 - Z_1)}{\rho \cdot \frac{V_{1\text{max.}}^2}{2}}$$

Потери напора по формуле 36

$$h_w = \xi_0 \frac{V_{1\text{max.}}^2}{2g} = 0,245 \cdot \frac{4,9^2}{19,62} = 0,30 \text{ метра.}$$

Величину потери напора можно определить и по формуле 37 без вычисления коэффициента ξ_0 :

$$h_w = 0,777 \frac{V_{2\text{max.}}^2}{g} \cdot \frac{F_2}{F_1} - 0,81 \cdot \frac{V_{1\text{max.}}^2}{g} - 0,35 \frac{V_{2\text{max.}}^3}{g} \frac{F_2}{Q} + \\ + 0,372 \frac{V_{1\text{max.}}^3}{g} \frac{F_1}{Q} + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1 \cdot \gamma}$$

Коэффициент потерь ξ_0 , подсчитанный экспериментальным путем при помощи формулы (39) для расхода $Q = 80 \text{ м/с}$, получается равным 0,20, а соответствующие потери напора (3):

$$h_w = \xi \frac{V_{\text{ср}}^2}{2g} = 0,20 \frac{4,5^2}{19,62} = 0,21 \text{ метра.}$$

Произведенные аналогичным образом подсчеты (для других опытов) показывают, что потери напора, подсчитанные по формуле (37), получаются на 30—40% больше, чем по формуле (39). Так и надо было ожидать, так как потери напора, подсчитанные с учетом неравномерного распределения скоростей, должны получаться больше, чем потери напора, подсчитанные по средним скоростям. Кроме того, в уравнении (39) не учитываются дополнительные потери напора, возникающие за счет вертикального уступа на дне водовода, что поддается учету при пользовании формулами (34) и (37).

Коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей, обычно бывают больше единицы. Так, для исследованных переходных участков из опытов получено (в сечении II—II)

$\alpha = 1,4$ для прямоугольного канала сечения и $\alpha = 1,2$ для трапециoidalного канала [3].

Для туннеля (сечение I—I) коэффициент неравномерности скоростей получился равным 1,07. Расширение потока, даже если оно незначительное, влияет на эпюру распределения скоростей. Поэтому определение коэффициента потерь (или потери напора) по формуле Борда (с поправочным коэффициентом Хиндса), должно быть выполнено по формулам, которые учитывают дополнительные потери напора, вызванные неравномерностью распределения скоростей в потоке, а также конструктивные особенности перехода, в частности уступа.

Предложенные нами формулы (34) и (37) не страдают этими недостатками, так как ими учитываются главнейшие факторы, обуславливающие потери напора в безнапорных водоводах при расширении потока.

Необходимо указать, что при выводе расчетных формул (34) и (37) мы ограничивались определенными значениями степеней ($1/7$ и $1/10$) в уравнениях (20) и (21). На практике эти степени могут меняться в широких пределах; поэтому вышеприведенные формулы в дальнейшем должны быть обобщены и уточнены для любого степенного закона распределения скоростей в потоке.

В ы в о д ы

1. Определением потери напора при плавном расширении потока в безнапорных водоводах занимались очень мало. Все исследования в этом направлении велись, главным образом, для напорных водоводов и сводились к уточнению значения коэффициента потерь в формулах Борда и Вейсбаха. Введение в формулы Борда и Вейсбаха коэффициента потерь, зависящего только от угла расширения, не может учитывать все специфические условия движения жидкости при расширении потока. Поэтому существующие расчетные формулы дают заниженные величины потери напора, как это доказывают эксперименты, проведенные в ЦАГИ.

2. Применение теоремы неупругого удара к потоку жидкости с принятием осредненных скоростей, как известно, не совсем правильно отражает физическую картину явления. Здесь мы не видим аналогии между ударом твердых тел и изменением скорости движения жидкости.

3. Коэффициенты потерь напора при плавном расширении потока должны определяться с учетом неравномерности распределения скоростей, так как величина кинетической энергии потока при этом получается больше, чем величина энергии, определяемая по средним скоростям.

4. Коэффициенты потерь напора, полученные нами с учетом неравномерности распределения скоростей более правильно отражают физическую сущность явления. В них учтены главнейшие факторы (неравномерность распределения скоростей, форма расширения водовода, расход жидкости, силы трения и конструктивные особенности перехода), которыми определяются потери напора.

Предлагаются следующие формулы:

$$h_w = \xi_0 \frac{V_{1\max}^2}{2g} \left[1,56 \left(\frac{V_{2\max}}{V_{1\max}} \right)^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 1,62 - 0,7 \left(\frac{V_{2\max}^3}{V_{1\max}^3} \right) \cdot \frac{F_2}{Q} + \right. \\ \left. + 0,74 V_{1\max} \cdot \frac{F_1}{Q} + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1 \cdot \rho \frac{V_{1\max}^2}{2}} - \frac{\gamma(Z_2 - Z_1)}{\rho \cdot \frac{V_{1\max}^2}{2}} \right] \cdot \frac{V_{1\max}^2}{2g}$$

или

$$h_w = 0,777 \frac{V_{2\max}^2}{g} \frac{F_2}{F_1} - 0,81 \frac{V_{1\max}^2}{g} - 0,35 \frac{V_{2\max}^3}{g} \frac{F_2}{Q} + 0,372 \frac{V_{1\max}^3}{g} \frac{F_1}{Q} + \\ + \frac{P_x - G_x^0 + T_x}{F_1 \cdot \gamma} - (Z_2 - Z_1).$$

5. Коэффициенты потерь, подсчитываемые по предложенной формуле, получаются на 30–40% больше по сравнению с коэффициентами, получаемыми по уравнению (1), (2) и (39), где приняты осредненные скорости потока.

Формулы (34) и (37) дают проверенные результаты при нормальном наполнении тоннеля и при полных углах расширения водовода прямоугольного и трапециoidalного сечения до 16° (нормальное наполнение тоннеля составляет 90% общей площади сечения). При иных наполнениях тоннеля необходимо пределы интегрирования в выражениях (26) и (30) соответственно изменять, что отразится на числовых коэффициентах второго и четвертого члена выражения (34) или (37).

6. Преимущество предложенных формул заключается еще в том, что по ним можно определять суммарные потери напора, вызываемые изменением формы поперечного сечения и конструктивными особенностями перехода, в частности уступа, что не поддается учету при пользовании существующими формулами.

Гидроэлектрическая лаборатория
Водно-Энергетического Института
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 25 VI 1949.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Есьман*.—Местные сопротивления в закрытых каналах и трубах и зависимость их от распределения скоростей в поперечном сечении. Ленинград, 1913.
2. *Идельчик*.—Тр. ЦАГИ, № 662, 1948; сб. № 3, ЦАГИ, 1947.
3. Отчеты Гидро-Эл. лаб. ВЭНИ АН Арм. ССР по исследованию дрифтации ГюмюшГЭС. Ч. I и II, 1948.
4. *Агроскин* и др.—Гидравлика, Москва, 1944.
5. *М. Э. Абрамов*—Изв. НИИГ, № 26, 1940.
6. Тр. ВНИИГМ под редакцией Потапова, 1936.—Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехническое применение.

Ա. Կ. ԱՆՈՒՅԱՆ

ՀՈՍԱՆՔԻ ՍԱՀՈՒՆ ԸՆԴԱՐՁԱԿՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ՃՆՇՄԱՆ
ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄՆ ԱՆՃՆՇՈՒՄ ԶՐԱՏԱՐԵՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Անճնշում ջրատարերի մեջ հոսանքի սահուն ընդարձակման ղեկքում ճնշման կորուստի որոշումով շատ քիչ են զրազվել: Այդ ուղղությամբ բարձր հետազոտությունները կատարվել են գլխավորապես ճնշումային ջրատարերի համար և հանդել Բորդի և Վեյսրախի բանաձևերում կորուստի գործակցի արժեքների ճշամանր: Բորդի և Վեյսրախի բանաձևերում կորուստի գործակցի մտցնելը, որը կախված է միայն ընդարձակման անկյունից, հոսանքի ընդարձակման ղեկքում չի կարող հաշվի առնել հեղուկի շարժման բոլոր յուրահատուկ պայմանները: Այդ պատճառով գոյություն ունեցող հաշվային բանաձևերը տալիս են ճնշման կորուստի նվազեցված մեծությունները, ինչպես այդ ապացուցում են ԱՂԴՄ-ում կատարված փորձերը:

Ինչպես հայանի է, հեղուկի նկատմամբ ոչ առաձգական հարվածի թեթևմի կերտումը ճիշտ չի արտացույց էրևայթի ֆիզիկական պատկերը, երբ օգտագործվում է արագությունների միջինացրած արժեքը: Այստեղ մենք անալոգիա չենք տեսնում պինդ մարմինների հարվածի և հեղուկի շարժման արագության փոփոխության մեջ:

Հոսանքի սահուն ընդարձակման ղեկքում ճնշման կորուստի գործակիցները պետք է որոշվեն՝ նկատի ունենալով արագության անհավասարաչափ բաշխումը, քանի որ հոսանքի կինետիկական էներգիայի մեծությունն այդ ղեկքում ավելի մեծ է ստացվում, քան միջին արագություններով որոշված էներգիայի մեծությունը:

Մեր ստացած ճնշման կորուստների գործակիցները, որոնց մեջ հաշվի է առնվում արագության անհավասարաչափ բաշխումը, ավելի ճիշտ են արտահայտում երևայթի ֆիզիկական էությունը: Նրանց մեջ հաշվի են առնված ճնշման կորուստը որոշող ամենադժվար գործոնները՝ արագության անհավասարաչափ բաշխումը, ջրատարի ընդարձակման ձևը, հեղուկի ծախսը, շփման ուժերը և անցման կոնստրուկտիվ առանձնահատկությունները:

ձնշման կորուստի որոշման համար առաջարկվում են հետևյալ բանաձևերը.

$$\begin{aligned}
 h_w = & \xi \frac{V_{1\max}^2}{2g} \left[1,56 \left(\frac{V_{2\max}}{V_{1\max}} \right)^2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 1,62 - 0,7 \left(\frac{V_{2\max}^3}{V_{1\max}^2} \right) \cdot \frac{F_2}{Q} + \right. \\
 & \left. + 0,74 V_{1\max} \cdot \frac{F_1}{Q} + \frac{q_x - G_x^0 + T_x}{F_1 \cdot \rho \cdot \frac{V_{1\max}^2}{2}} - \frac{\gamma(Z_2 - Z_1)}{\rho \cdot \frac{V_{1\max}^2}{2}} \right] \cdot \frac{V_{1\max}^2}{2g} \quad \text{կամ} \\
 h_w = & 0,777 \cdot \frac{V_{2\max}^2}{g} \cdot \frac{F_2}{F_1} - 0,81 \frac{V_{1\max}^2}{g} - 0,35 \frac{V_{2\max}^3}{g} \cdot \frac{F_2}{Q} + \\
 & + 0,372 \frac{V_{1\max}^3}{g} \cdot \frac{F_1}{Q} + \frac{2x - G_x^0 + T_x}{F_1 \cdot \gamma} - (Z_2 - Z_1)
 \end{aligned}$$

Առաջարկված բանաձևերով հաշված կորուստների գործակիցներն ստացվում են 30—40% ավելի, քան (1), (2) և (39) բանաձևերով հաշված մեծությունները, որտեղ ընդունված են միջին արագություններ: (34) և (37) բանաձևերը ապիտ են փորձով ստուգված սվյալներ, երբ նորմալ լեցում ունեցող կտր կտրվածքով գեանանցքը միանում է ուղղանկյուն կամ արագեցած կանալին: Այդ դեպքում անցման լրիվ անկյան մեծությունը պետք է լինի մինչև 16° (գեանանցքի նորմալ լեցումն ամբողջ մակերեսի 90° է կազմում): Գեանանցքի այլ լեցվածության դեպքում (26) և (30) արտահայտություններում անհրաժեշտ է համապատասխանորեն փոփոխել կնակրման սահմանները, որը կանդրադառնա (34) և (37) արտահայտությունների երկրորդ և չորրորդ թվային գործակիցների վրա: Առաջարկված բանաձևերի առավելությունը նաև նրանում է, որ նրանցով կարելի է որոշել ձնշման ընդհանուր կորուստը, պայմանավորված ընդլայնական հատվածի ձևի փոփոխումով և անցման կոնստրուկտիվ առանձնահատկություններով, մասնավորապես ելուստի, որը գոյություն ունեցող բանաձևերով ենթակա չէ հաշվառման:

С. С. Аветисов

Определение скорости и направления потока во всасывающей трубе водяных турбин цилиндрическим зондом

Для измерения направления скорости потока на практике применяются специальные насадки (трубки). К числу таких насадков относятся цилиндрический насадок и шаровый зонд. Шаровый зонд имеет пять отверстий на сфере: одно в центре, а две пары — в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях симметрично центрального отверстия. Здесь, также как в цилиндрическом насадке, центральное отверстие с каким-либо из крайних может служить для определения величины скорости потока. Каждая пара других отверстий, расположенных в одной плоскости с центральным отверстием, служит для определения направления струй потока.

Для испытания всасывающей трубы в натуре возникла необходимость создать такой прибор, которым можно было бы произвести замеры величины и направления скорости, а также давлений во всасывающей трубе при работе агрегата и получить картину потока в натуре.

Существуют приборы, при помощи которых в лабораторных условиях определяют интересующие величины вблизи граничной поверхности потока, а также и внутри него. К числу таких приборов относятся трубка Пито и шаровый зонд.

Эти приборы крепятся консольно и вводятся в поток. Применение этого способа затруднительно в условиях исследований в натуре ввиду больших размеров всасывающей трубы. При этом сильно осложняется крепление консоли, подверженной большим усилиям.

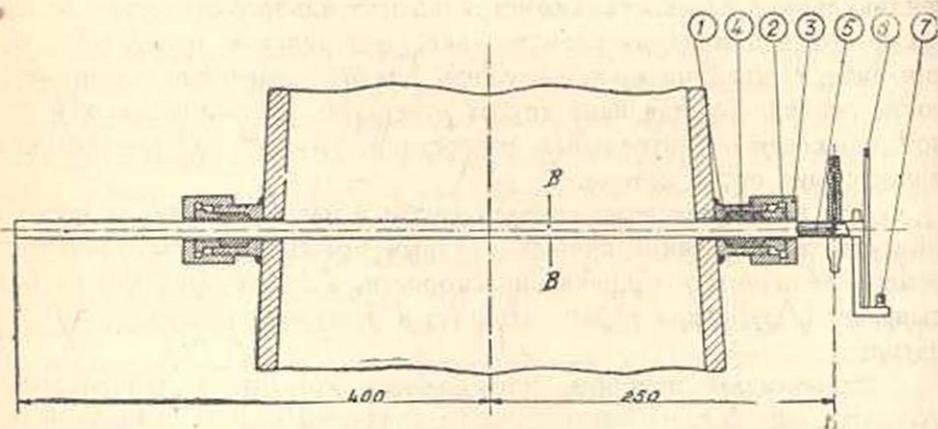
На основании вышесказанного проф. И. В. Егиазаровым было предложено автору сконструировать как для турбин КанакерГЭС, так и для турбин Гидро-электрической лаборатории АН Арм. ССР цилиндрический зонд, который проходил бы всасывающую трубу насквозь и опирался бы на обе ее стенки. С помощью сконструированного прибора были проведены испытания на агрегате № 1 Канакер-ГЭС (Тер-Акопов и др.), показавшие всю практическую его применимость и прочность.

Показания прибора дают возможность проанализировать поток во всасывающей трубе. Результаты испытания приведены в отчетах

полевой группы КанакерГЭС-а, работавшей под руководством Г. Д. Тер-Акопова.

В настоящее время изготовлен и оттарирован такой прибор для лабораторных исследований. В основу идеи цилиндрического зонда положен принцип действия цилиндрического насадка, применяющегося для измерения направления скорости потока в одной плоскости [2]. Прибор позволяет производить замеры скорости и направления потока от стенки до среднего сечения всасывающей трубы.

Прибор состоит из цилиндра, в одном из сечений которого имеются три отверстия, расположенные друг относительно друга на 30° (рис. 1, сеч. В—В). Диаметры отверстий—1,5 мм. От каждого отверстия отходят медные трубки, расположенные внутри цилиндра и оканчивающиеся штуцерами, связанными пьезометрами. На свободном конце цилиндра укреплен металлический круг с градусными делениями, с помощью которого можно определить угол поворота зонда относительно вертикали. Общий вид прибора изображен на рис. 1.



1. Корпус сальника. 2. Вкладыш. 3. Гайка накидная.
4. Набивка сальника. 5. Цилиндрический зонд. 6. Лимб лимба. 7. Шкала лимба.

Рис. 1.

В диаметрально противоположных точках образующей всасывающей трубы просверливаются два отверстия и привариваются корпусы сальника (рис. 1, деталь № 1). В эти отверстия пропускается цилиндрический зонд, затем набиваются сальники и затягиваются накидной гайкой (дет. № 3). Такое крепление дает возможность вращать цилиндрический зонд относительно продольной оси, пока установится одинаковое давление в боковых отверстиях. Угол поворота лимба дет. № 6 по отношению к уровню лимба дет. № 7 определяет направление потока.

Цилиндрический зонд, по сравнению с другими насадками, обладает, прежде всего, тем преимуществом, что взаимное располо-

жение отверстий строго фиксировано и, следовательно, коэффициенты тарировки обладают большим постоянством. Благодаря большой разности давлений в боковых отверстиях на цилиндре, точность измерения повышается и доходит приблизительно до 5%.

Крепление прибора, которое осуществляется в диаметрах на противоположных точках всасывающей трубы, обеспечивает надежную и устойчивую работу прибора. Вследствие этого режим потока во всасывающей трубе мало искажается благодаря сравнительно небольшим размерам прибора (диаметр цилиндра 12 мм).

Теоретическая схема действия прибора

Основной принцип действия цилиндрического зонда можем получить после анализа потока во всасывающей трубе, который обтекает прибор.

При исследовании потока во всасывающей трубе нужно иметь в виду следующее обстоятельство.

В потоке, за исключением тех его зон, где образуются вихри, равнодействующая скорости потока симметрична относительно оси всасывающей трубы и определяется следующими условиями:

во-первых — масса жидкости, выходящая из каналов рабочего колеса турбины, равномерно вращается с постоянной угловой скоростью ω около оси z всасывающей трубы; во-вторых — поток имеет начальную скорость v_0 , направленную по оси всасывающей трубы и, в-третьих — поток находится под действием силы тяжести.

В соответствии с этим получим:

$$v_x = \omega y \quad v_y = \omega x \quad v_z = v_0 \quad (1)$$

При этом имеется в виду, что поток установившийся. Тогда соблюдается уравнение неразрывности

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} = 0 \quad (2)$$

Так как уравнение неразрывности выполняется тождественно, то уравнения движения будут иметь вид:

$$\omega^2 x = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \quad \omega^2 y = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + g \quad (3)$$

Эти уравнения имеют общий интеграл

$$-\frac{p}{\rho} = \frac{1}{\rho} \omega^2 (x^2 + y^2) - gz + \text{const} \quad (4)$$

Следовательно, в каждой точке плоскости, проходящей через ось z всасывающей трубы, для несжимаемой жидкости можно определить давление в потоке по формуле (4).

Рассматривая изменение давления в данной плоскости, мы можем принять второй член в правой части уравнения (4) в виде

$$-gz = C \frac{1}{\rho}$$

Следовательно, для k -той плоскости, перпендикулярной z , будем иметь общий интеграл уравнения движения в следующем виде:

$$-\frac{p}{\rho} = -\frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) + \text{const} + \frac{1}{\rho} C. \quad (5)$$

Принимая на основании второго условия

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} = \text{const}, \text{ получим:}$$

$$-\frac{p}{\rho} = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) + \frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} - \frac{1}{\rho} C \quad (6)$$

или

$$-p = \frac{\rho}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) + p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} - C. \quad (7)$$

Но так как

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= r^2, \quad \text{то} \\ p + p_0 &= p_s. \end{aligned}$$

Отсюда

$$-p_s = \frac{\rho}{2} (\omega^2 r^2 + v_0^2) - C. \quad (8)$$

Здесь ωr есть окружная скорость данной точки, которую обозначим через v_r .

Уравнение (8) переписывается так:

$$-p_s = \frac{\rho}{2} (v_r^2 + v_0^2) - C. \quad (9)$$

Обозначив суммарную скорость движения жидкости в данной точке плоскости через v_s , будем иметь

$$p_s + \frac{\rho v_s^2}{2} = C. \quad (10)$$

При исследовании всасывающей трубы нас интересует полное давление p_s , величина суммарной скорости и направление этой скорости.

Рассмотрим поле скоростей:

Ось Z — направлена перпендикулярно к плоскости чертежа.

Возьмем на плоскости XOY точку N (рис. 2) на расстоянии r от центра O . Проведя через точку N плоскость, параллельную оси Z и перпендикулярную к радиусу r , можем представить диаграмму скоростей.

Рассмотрим цилиндр с бесконечно малым диаметром, ось которого совпадает с радиусом r . На основании вышесказанного попереч-

ное сечение цилиндра будет совпадать с плоскостью, проведенной через точку (N).

Выбираем оси координат так, чтобы ось X совпадала с вектором скорости v_s , ось Z — с осью цилиндра.

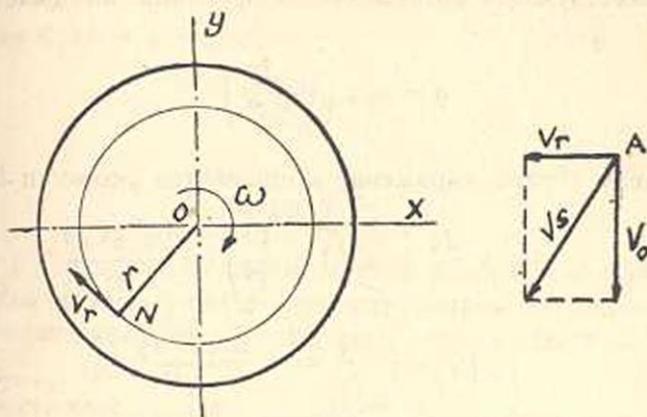


Рис. 2.

На основании сделанных допущений мы получим случай обтекания цилиндра параллельным потоком, находящимся под статическим давлением p_s и имеющий скорость v_s .

Для любой точки P круга (рис. 3) имеет место равенство.

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

Потенциальная функция потока должна удовлетворять следующим трем условиям.

1. Вдали от цилиндра должно быть:

$$v_x = v_s, \quad v_y = 0, \quad (11)$$

где v_x и v_y — скорость в данной точке.

2. При обтекании цилиндра потоком, в силу пограничных условий, скорость направлена по касательной к окружности цилиндра. Тогда компоненты скорости нормальные и поверхности равны нулю, т. е.

$$v_x \frac{dF}{dx} + v_y \frac{dF}{dy} = 0, \quad (12)$$

где функция F, определяющая поверхность цилиндра, имеет вид:

$$F = x^2 + y^2 - R^2 = 0 \quad (13)$$

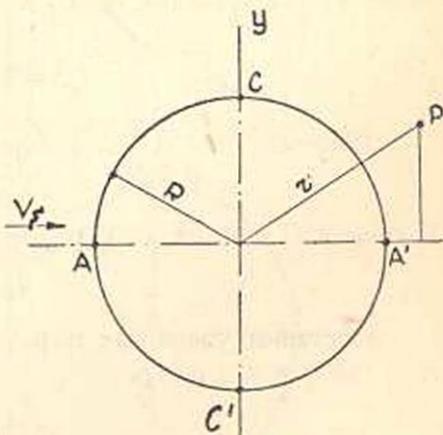


Рис. 3.

3. Уравнение неразрывности:

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad (14)$$

Соответствующая потенциальная функция выражается уравнением [1]

$$\varphi = v_0 x \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (15)$$

Составим теперь выражение компонентов скорости по осям:

$$v_x = + \frac{d\varphi}{dx} = v_0 \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{2v_0 x^2 R^2}{r^4},$$

$$v_y = + \frac{d\varphi}{dy} = - \frac{2v_0 R^2 xy}{r^4}. \quad (16)$$

Выражение полной скорости будет:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2.$$

Нас интересует давление на поверхности цилиндра. Для этого предварительно вычислим скорость на поверхности и обозначим ее через v_R . Подставляя везде в уравнения $r = R$, получим (рис. 3 и 4):

$$v_R^2 = 4v_0^2 \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \right). \quad (17)$$

В точках А и А', т. е. при $x = \pm R$

$$v_R = 0.$$

В точках С и С', т. е. при $x = 0$ скорость будет наибольшая:

$$v_R = 2v_0.$$

Составим уравнение Бернулли для двух точек вдали от цилиндра, где $v = v_0$, $p = p_0$:

$$p_0 + \frac{\gamma}{2g} v_0^2 = C \quad (18)$$

и соответственно для точки, лежащей на поверхности цилиндра:

$$p_R + \frac{\gamma}{2g} v_R^2 = C. \quad (19)$$

Из этих уравнений получим* давление на поверхности цилиндра из выражения:

$$p_R = p_0 + \frac{\gamma}{2g} (v_0^2 - v_R^2). \quad (20)$$

Подставив вместо v_R ее значение, получим давление в любой точке поверхности цилиндра:

$$p_R = p_s + \frac{\gamma}{2g} v_s^2 \left(4 \frac{x^2}{R^2} - 3 \right) \quad (21)$$

или, обозначив буквой k величину

$$k = 4 \frac{x^2}{R^2} - 3,$$

будем иметь

$$p_R = p_s + k \frac{\gamma}{2g} v_s^2 \quad (22)$$

На рис. 4 представлено распределение давления на поверхности цилиндра. Силы давления везде перпендикулярны к поверхности цилиндра. В критической точке А скорость равна нулю $v=0$, а давление равно p_{\max} . В точке С скорость наибольшая, $v_{\max} = 2v_s$, а соответственно давление равно p_{\min} . Между точками А и С должна быть, следовательно, некоторая точка, например, точка В, в которой скорость имеет промежуточное значение между $v=0$ в точке А и $v=2v_s$ в точке С, т. е. в этой точке скорость должна иметь значение v_s невозмущенного потока. Положение этой точки мы получим из уравнения (17), подставляя $v_R = v_s$. Тогда получаем:

$$x = x_s = \pm \frac{R}{2} \sqrt{3}.$$

Давление в точке В получается из уравнения (20) при $v_R = v_s$ и будет $p = p_s$, как и следовало ожидать.

Следовательно в точках В и В' значения скорости и давления соответствуют их значениям вдали от цилиндра для невозмущенного потока.

Последнее обстоятельство служит теоретической основой прибора цилиндрический зонд.

Давление в точке А в силу того, что в этой точке $v_R=0$, соответствует p_{\max} . Подставляя значение $v_R=0$ в формулу, получим

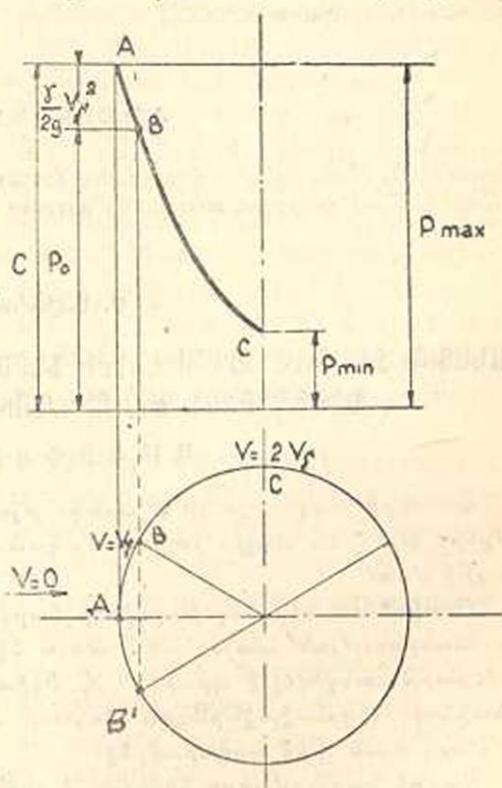


Рис. 4.

давление в точке В, соответствующее давлению невозмущенного потока и равное p_s . Следовательно, если мы замерим давление в точках А и В, то разность давлений в этих точках даст нам скоростной напор, из которого мы можем вычислить скорость невозмущенного потока.

Таким образом

$$p_{\text{макс}} - p_s = \frac{\gamma}{2g} v_s^2 = \gamma h.$$

Прибор позволяет также определить направление потока. Для этого необходимо вращать цилиндрический зонд вокруг оси, пока показания пьезометров, присоединенных к левому и правому отверстиям, не выравняются. Таким образом, можно установить направление потока на разных расстояниях от оси всасывающей трубы.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 10 VIII 1949.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кочин Н. Е., Кибель И. А. и Розе Н. В.—Теоретическая гидромеханика, 1948 г., ч. I.
2. Попов С. Г.—Измерение воздушных потоков, 1947 г.

Ս. Ս. Ավետիսյան

ԳԼԱՆԱՅԻՆ ԶՈՆԴՈՎ ԶՐԱՆԻՎՆԵՐԻ ՆԵՐԾԾՈՂ ԽՈՂՈՎԱԿՈՒՄ ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՈՒՂՂՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոսանքի ուղղութիւնը և արագութիւնը որոշող գոյութիւն ունեցող սարքերը թույլ են տալիս չափումներ կատարել ներծծող խողովակի մակերևույթի մոտ:

Բնականում ներծծող խողովակի կարվածքի բոլոր կետերում հոսանքի ուսումնասիրութեան համար անհրաժեշտ եղավ ստեղծել նոր սարք: Այդպիսի սարք ստեղծվել է պրոֆ. Ի. Վ. Եղիազարովի առաջարկութեամբ, որը Քանաքեռի հիդրա-էլեկտրական կայանի № 1 ագրեգատի փորձարկման ժամանակ իրեն լրիվ արդարացրեց:

Սարքի կառուցվածքը հիմնված է շրջնաձև ղեկքում գլանի շրջանային հատույթի ուղղութեամբ արագութեան փոփոխութեան վրա:

ГИДРОЛОГИЯ

Г. А. Осипов

**Подземный сток из озера Севан и родники
Арагатской котловины***

Изучение влияния снижения уровня озера Севан на дебит и химизм родников Арагатской котловины имеет исключительное значение, поскольку все водоснабжение Арагатской котловины, как существующее, так и будущее, основано на родниковой воде.

В результате исследований, выполненных Севанским Гидрометеорологическим Бюро в 1927—30 г.г. [1, 2, 3, 4, 5], была установлена фильтрация из озера Севан. Озерная вода была обнаружена в Рндамал-Макраванских родниках в количестве $2/3$ от общего дебита их. Изучая динамику хлорного числа в указанных родниках, исследователи пришли к выводу, что фильтрация из озера происходит с верхних горизонтов и что при сработке озера на 10 метров она должна прекратиться. Участие озера в питании прочих родников Арагатской котловины Севанским Гидрометеорологическим Бюро отрицалось.

Вопросу о том—связаны ли родники Арагатской котловины с озером Севан или нет и какова дальнейшая судьба мощных родников, выклинивающихся в бассейне реки Раздан (Занги), в частности Крхбулагских, в связи со спуском озера Севан—уделялось много внимания, причем исследователи приходили иногда к противоположным выводам. Одни отрицали вообще всякую возможность фильтрации из озера, другие допускали ее, но в очень ограниченных размерах и, наконец, были и такие, которые склонны были думать, что основные родники Арагатской котловины, как например: Крхбулагские, Арзаканские, Гюмушские, Алапарские, Гарнинские и другие получают питание из озера Севан и в результате его спуска должны будут иссякнуть или, в лучшем случае, уменьшить свой дебит.

Все эти высказывания нельзя считать голословными. Каждый из авторов [6, 7, 8] старался на каком-то материале обосновать свою концепцию.

Наличие таких разноречивых мнений, безусловно, приводило к

* По исследованиям Водно-Энергетического Института АН Арм. ССР.

некоторой неуверенности при решении конкретных практических задач, связанных с вопросом использования того или иного родника, хотя бы в качестве источника водоснабжения, обостряло интерес к этому вопросу и требовало дальнейшего изучения этого вопроса в современных условиях, т. е. в реальных условиях снижения уровня озера Севан.

Именно в связи с этим обстоятельством Водно-Энергетическим Институтом Академии Наук Армянской ССР (ВЭНИ) с 1946 года были организованы систематические наблюдения за режимом некоторых основных родников Араратской котловины, к числу которых были отнесены в первую очередь Ридамал-Макраванские родники (Ахтинский район), как имеющие несомненную связь с озером Севан, на которую явно указывали химизм вод и модуль подземного стока, затем Крхбулагские, Гюмушские, Гарвинские и другие.

Наблюдения эти продолжаются и по настоящее время. Наибольший интерес в данном исследовании представлял вопрос—изменился ли дебит родников после того, как уровень озера снизился на 2,5—3,0 метра?

Для решения этого вопроса следовало попытаться, в первую очередь, восстановить действовавшие в 1928—30 г. г. гидрометрические створы на Ридамал-Макраванских родниках, учитывающие суммарный дебит отдельных групп родников и по ним вести наблюдения в настоящее время. Однако, в существующих условиях, когда некоторые родники затоплены (Макраванские), другие подперты (Ридамальские), а по реке Раздан проходят расходы, в 25—30 раз превышающие бытовые, возможная ошибка измерения расходов, величина которых превышает дебит выходящих в русле реки Атарбекияских и Макраванских родников (основная масса), восстановить прежние гидростворы, естественно, было невозможно. Поэтому, в целях изучения изменений дебита родников в связи с понижением уровня озера, ВЭНИ было приступлено к наблюдениям над дебитом отдельных родников ридамальской и атарбекиянской групп, которые выйдут выше уреза воды в р. Раздан.

Среди многочисленных выходов Ридамал-Макраванских родников, допускающих непосредственное производство замеров, оказались следующие девять, считая их сверху вниз по течению реки Раздан: „Баклачи“ (№ 96), „Авазани“ (№ 95), „Ерванди“ (№ 97), „Дзкан-Джрагаци“ (№ 98), „Ахпюрнер II“ (№ 101), „Чрик“ (№ 102), „Тамеи“ (№ 104), „Карвансарайский“ (№ 105) и „Бери“ (№ 108). Условия выхода остальных трех родников „Ахпюрнер I“ (№ 100), „Хшой I“ (№ 107) и „Камурджи“ (№ 110)—исключали эту возможность.

Если суммарный дебит за 1948 г. всех перечисленных родников принять за 100%, то характеристика их по мощностям представится в следующем виде:

Таблица 1

№№ родников	96	95	97	98	101	102	104	105	108	
Дебит в %‰	0,0003	2,7	0,001	76	9	0,002	0,0006	8,1	4,2	100

Как это видно из таблицы 1, наиболее мощным родником является родник № 98 — „Дзкан-Джрагац“. Фактически он состоит из двух групп родников, непосредственно примыкающих друг к другу. Одна из групп носит название „Дзкан“, а другая „Джрагац“. Отметки выходов „Джрагац“ выше отметок выходов родника „Дзкан“ на 1,0—1,10 м. Будучи водообильным родником, № 98 практически не реагирует на случайные воды местного происхождения, как-то: дождевые, талые и другие, стекающие с территорий, непосредственно примыкающих к месту выхода родника, поскольку количество их составляет ничтожный процент по сравнению с количеством воды, поступающей из основного источника питания. Однако этого нельзя сказать о маломощных родниках, к числу которых относятся такие родники, как №№ 96, 97, 102 и 104. Они, безусловно, в самой сильной форме реагируют на всякие случайные воды. Подметить эти случайные воды, а тем более учесть их в количественном отношении абсолютно не представлялось возможным. Они в большинстве неуловимы.

Из всего этого следует, что делать какие-либо предположения о происхождении Ридамал-Макраванских родников или говорить об их режиме в реальных условиях снижения уровня озера Севан возможно, только основываясь на гидрографах мощных родников, к числу которых, в первую очередь, относится родник „Дзкан-Джрагац“ (№ 98). С этой точки зрения значимость родника № 98 сильно возрастает.

Ввиду невозможности восстановления „старых“ створов ВЭИ были организованы трехлетние (1946—1948 г.г.) наблюдения за дебитами отдельных выходов Ридамал-Макраванских родников. Наряду с этим, большое значение было придано гидрохимическому методу, который в данном случае допускал возможность непосредственного сопоставления солевого состава воды за два периода—до начала спуска озера Севан и в процессе спуска.

За истекшие три года по девяти родникам было произведено свыше 500 замеров дебитов с одновременным определением температуры воды и выполнено 272 химических анализа проб воды.

В таблице 2 сопоставляются среднегодовые дебиты некоторых родников из числа Ридамальских, имеющих замеры, выполненные ВЭИ в более ранние сроки (1940—1942 г.г.) в связи с составлением кадастра родников Араратской котловины, положенным потом в основу им же составленной Генеральной схемы водоснабжения Араратской котловины.

Принимая условно величину дебитов родников №№ 95, 98 и 100, замеренных в 1940 году, и № 97 и № 101, замеренных в 1942 г., за 100%, изменения таковых за истекшие годы в %/о выразятся в следующих цифрах:

Таблица 2

Годы	№№ родников				
	95	97	98	100	101
1940	100	—	100	100	—
1942	—	100	99	50	100
1946	—	63	91	1	—
1947	650	61	72	1	—
1948	650	51	68	1	53

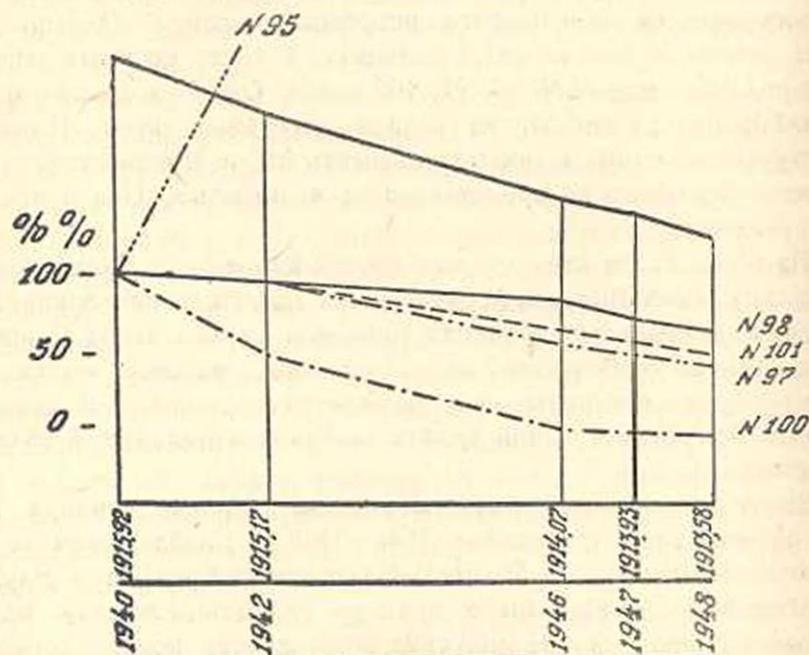


График сработки уровня озера Севан за 1940—1948 г.г. и уменьшения, в связи с этим, дебита Рядамальских родников.

Таблица 2 определенно указывает на происшедшие изменения дебитов, которые, как в этом убедимся мы ниже, должны быть приписаны озеру Севан. Снижение уровня озера Севан за 1940—1848 г.г. примерно на 2,5 м (по сравнению с уровнем 1929 г.) вызвало уменьшение дебита основного родника № 98 на 30%, которое произошло как вследствие иссякания группы под названием „Джрагаци“, так и иссякания части выходов под названием „Дзкан“. Родник № 100, известный под названием „Ахпюрнер I“, имеющий отметки несколь-

ко более высокие, чем отметки „Джрагац“, практически иссяк еще в 1946 году. Почти вдвое уменьшили свой дебит и другие родники — „Ахпюрнер II“ (№ 101) и „Ерванди“ (№ 97).

Таким образом, снижение уровня озера уже заметно сказалось на дебите Рвдамал-Макраванских родников.

Отмеченное в таблице 2 снижение расходов родников за период 1940—48 г.г., убедительно увязывающееся с фактом снижения уровня озера Севан, получает еще большее подтверждение при сопоставлении с расходами родников смежных бассейнов, не имеющих отношения к озеру Севан, где за эти годы по метеорологическим условиям отмечается не непрерывное уменьшение дебитов, а их колебания с обычными для данных родников амплитудами (см. табл. 6 и 7).

Совсем иначе реагировал на это обстоятельство родник № 95. Его дебит по сравнению с прошлым увеличился более чем в шесть раз. Как увидим ниже, одновременно с увеличением дебита заметно изменился также и солевой состав его воды. Пресная в прошлом вода в настоящее время содержит все признаки, присущие озерной воде. Увеличение дебита произошло, как это видно из дальнейшего, в результате увеличения фильтрации из реки Раздан в связи с увеличивающимися из года в год попусками из оз. Севан. Геологические условия береговой полосы р. Раздан благоприятствуют указанной фильтрации.

За количественными изменениями последовали и качественные изменения воды родников. Так, например, если сравнить содержание некоторых характерных ионов в воде отдельных родников за два периода 1927—1930 г.г. и 1948 г., приняв за 100% среднее содержание их в 1927—1930 г.г., то по отдельным родникам будем иметь следующую картину изменения химизма к 1948 году в %/о:

Таблица 3

№№ родников	Ca	Mg	Cl
95	102	109	125
98	135	83	87
101	113	92	99
102	128	97	—
105	119	102	101
108	115	73	90
110	114	90	94

Из таблицы 3 легко усмотреть повсеместное увеличение иона Ca и уменьшение ионов Mg и Cl. Исключение составляет родник № 95, где, наоборот, наблюдается увеличение ионов Mg и Cl, т. е. тех ионов, которыми богата озерная вода.

Гидрометеорная вода характерна преобладанием в ней иона Ca над ионом Mg. Вода же озера Севан характеризуется значительным

преобладанием иона Mg над ионом Ca. Поэтому их соотношение является весьма характерным показателем для обнаружения увеличения или ослабления влияния озера.

В таблице 4 приведены коэффициенты, полученные как частное от деления иона Mg на ион Ca, выраженные в миллиграмм-эквивалентах.

Таблица 4

№№ родников	$\frac{rMg}{rCa}$	
	1927—30 г.г.	1948 г.
95	1,28	1,36
98	2,32	1,45
101	2,73	2,20
102	2,74	2,06
105	2,68	2,27
108	2,79	1,76
107	2,53	2,01
110	1,89	1,48

Если сопоставить эти величины с той же величиной для озерной воды, равной $\frac{rMg}{rCa} = 2,72$, то легко заметить, что родниковые воды Ридамал-Макравана в первом периоде стояли много ближе к озерной, чем во втором периоде. Вода родников в прошлом больше напоминала озерную, чем теперь. Другими словами, озерная, составляющая смеси во втором периоде уменьшилась и коль скоро уменьшился и дебит родников, то отсюда вывод—происшедшие количественные и качественные изменения логически увязываются с уменьшением фильтрации из озера Севан.

Изменение химического состава воды родника № 95, выразившееся в увеличении во втором периоде содержания в воде иона Mg и в особенности иона Cl' , определенно указывает на усилившееся влияние озерного фактора. На это указывает и гидрометрия. Это обстоятельство, как мы видели выше, могло быть вызвано исключительно влиянием реки Раздан с её большими попусковыми расходами, особенно усилившимися с 1946 года, когда по Раздан, на участке от истока до впадения в неё р. Мармарик (Маман), стали проходить расходы, более чем в 20—25 раз превышающие бытовые.

Несколько слов о термическом режиме Ридамал-Макраванских родников.

В прошлом было установлено, что температура воды отдельных родников в течение года не была подвержена каким-либо колебаниям. Она была постоянной. Наблюдения ВЭИ за 1947 и 1948 г.г.

подтверждают это постоянство. В особенности хорошо подчеркивается это наблюдениями 1948 года, в течение которого температура воды каждого родника определялась в среднем по 40 раз и неизменно показывала одну и ту же величину, но отличную от температуры первого периода.

Сравнивая температуру воды (таблица 5) за два периода, можно заметить увеличение ее во всех родниках, за исключением родника № 110, где она сохранила свою первоначальную величину.

Таблица 5

Годы	№№ родников							
	95	98	101	102	105	108	107	110
1927—30	9,5	9,1	8,7	8,9	8,7	7,4	7,4	7,4
1948	9,9	9,8	9,2	9,1	9,0	7,7	7,6	7,4

Особенно заметно это увеличение в роднике № 98, являющемся в настоящее время ведущим. На снижение уровня озера Севан в наиболее сильной форме реагировал он: снизил свой дебит на 30%, приобрел новый химический облик, став ближе к химии метеорной воды своего бассейна питания и, наконец, изменил свою термику. Все эти изменения, безусловно, нужно приписать уменьшению фильтрации из озера Севан, поскольку во всем остальном естественно-историческая обстановка прошлого не подверглась никаким изменениям.

Теперь посмотрим, сказалось ли снижение уровня озера Севан на основных родниках Араратской котловины?

Возьмем Крхбулагские родники. Если дебит их, замеренный в 1926 году, примем за 100%, то последующие замеры представятся в следующем виде:

Таблица 6

1926	1928	1929	1930	1942	1945	1947	1948
100	99	103	111	101	110	113	107

Таблица 6 определенно подтверждает устойчивость дебита группы родников. Снижение озера, как это видно из таблицы, никакого влияния на родники не оказывает.

Не реагировали на снижение озера также и Гюмушские родники. Их дебит, замеренный в августе 1947 г., даже несколько (7%) превысил дебит, замеренный в июле 1929 г.

Мало изменился и солевой состав воды. Если отношение $\frac{rMg}{rCa}$ в

1929 году составляло 1,31, то в 1947 г. оно показало почти ту же величину—1,25.

Алапарские родники показывают следующую динамику дебита в ‰ ‰:

Таблица 1

VII 1929	XI 1935	X 1937	X 1940	X 1941	X 1942	XIII 1947
100	101	93	75	113	98	152

Приведенные цифры определенно отрицают всякое влияние озера на режим данной группы родников. Наблюдаемые колебания дебита должны быть приписаны водности того или иного года, а также сезонному характеру режима родников.

Рассмотрим, наконец, родники села Гарни. Они замерялись ВЭИ три раза—28/IX—1940г., 17/X—1942 г. и 14/VIII—1947 г. Температура воды этого родника при всех замерах оставалась неизменно равной 7,2°. Что же касается дебита, то его величина по той же причине, что и для Алапарских, подвергалась постоянному изменению. Так, например, замер, произведенный в 1942 г., показал увеличение дебита по сравнению с 1940 г. на 28‰, а последующий замер по сравнению с тем же годом показал увеличение уже на 60‰.

Заканчивая на этом краткий обзор качественных и количественных изменений, происшедших за истекшие годы в основных родниках Араратской котловины, можно указать на то, что снижение уровня озера Севан отразилось лишь на Рндамал-Макраванских родниках. Что же касается остальных родников Араратской котловины, то контрольные замеры, выполненные за последние два года, определенно указывают на то, что снижение озера не отразилось ни на дебите родников, ни на их солевом составе. Изменения того и другого нужно приписать только сезонным колебаниям, но никак не влиянию уровня озера Севан.

На основе всего того, что было сказано выше, можно сделать следующие выводы:

1. В результате снижения уровня озера Севан на 2,5—3,0 м фильтрация из озера заметно уменьшилась.

2. На уменьшение фильтрации из озера Севан реагировали все родники рндамал-макраванской группы, за исключением родника „Авазани“ (№ 95).

3. Снижение уровня озера Севан особенно заметно сказалось на дебите самого мощного родника этой группы—на роднике „Дзкан-Джрагац“ (№ 98), снизившего свой дебит примерно на 30‰.

4. В связи с большими попусковыми расходами фильтрация воды из реки Раздан увеличилась. Пока что наиболее заметно сказалась она на дебите и химии родника „Авазани“ (№ 95).

5. Отмечено заметное повышение температуры воды во всех

родниках рндамал-макраванской группы. Наибольшее повышение, порядка одного градуса, отмечено в роднике № 98.

6. Во всех родниках, начиная от № 98 и вниз по течению реки Раздан, температура воды в течение года остается практически неизменной. Такое постоянство отмечено и в прошлом, но только при более низких значениях температуры воды.

7. В связи с увеличившимися попусками из оз. Севан, в результате ввода в эксплуатацию постоянного водоприемника на озере, доступными для непосредственного использования остались три родника за №№ 98, 101 и 105. Из них наиболее мощным является родник № 98, который и должен быть рекомендован в качестве основного источника водоснабжения при решении практических задач. Родники за №№ 101 и 105 сравнительно маломощны и не могут являться надежными источниками водоснабжения.

8. Фильтрация из озера происходит с верхних горизонтов, а не с глубоких. Иначе говоря, предположение о том, что фильтрация из озера прекратится при некотором снижении его уровня, оправдывается.

9. Снижение озера Севан примерно на 2,5—3,0 м не отразилось на дебите и химизме основных родников Араратской котловины, что дополнительно подтверждает отсутствие их связи с оз. Севан.

Водно-Энергетический Институт
Академии наук Армянской ССР.

Поступило 25 VI 1949.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В. К.—Водный баланс оз. Севан. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна. Ч. IV, Ленинград, 1938.
2. Соколов А. П.—Бюллетень Бюро Гидромет. исследований на озере Севан (Гокча) № 7—8. Эривань, 1929.
3. Соколов А. П.—Подземный сток воды из озера Севан. Изд. Севанского Гидромет. Бюро. Ч. I, вып. 4. Эривань, 1934.
4. Ляпши С. Я.—Материалы гидрохим. исследований. Изд. Севанского Гидромет. Бюро. Ч. IV, вып. I. Ленинград, 1932.
5. Киреев И. А.—Гидрограф. работы на озере Севан. Изд. Севанского Гидромет. Бюро. Ч. V. Ленинград, 1933.
6. Турцев А. А.—Гидрогеол. очерк бассейна реки Занги. Изд. АН СССР, Ленинград, 1931.
7. Паффенгольц К. Н.—Бассейн озера Гокча (Севан). Тр. Всесоюзного Геологоразвед. объединения НКТП СССР. Вып. 219. Изд. ОНТИ, 1934.
8. Кузнецов С. С.—Гидрогеология Северо-Западного побережья озера Гокча. Изд. АН СССР, Ленинград, 1929.

Գ. Ա. Օսիպով

ՍՏՈՐԵՐԿՐՅԱ ՀՈՍԲԸ ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻՑ ԵՎ ԱՐԱՐԱՏՅԱՆ
ԴԱՇՏԻ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Այն հարցը, թե Արարատյան դաշտի աղբյուրները կապված են արդյոք Սեանա լճի հետ և ի՞նչ է կատարվելու նրանց հետ Սեանա լիճն իջեցնելիս, դրված է եղել և անցյալում և հետագա տարիներին, ըստ որում տարբեր հետազոտողներ երբեմն դալիս էին իրար հակառակ եզրակացությունների. նրանց մի մասն առնատարակ հերքում էր լճից ֆիլտրացման հնարավորությունը. մյուսներն այդ հնարավոր էին համարում, բայց սահմանափակ քանակով, և վերջապես կային հետազոտողներ, որոնք կարծում էին, որ Արարատյան դաշտի հզոր աղբյուրները, ինչպես օրինակ՝ Ղրխուլաղի, Արզաքանի, Գյումուշի, Ալափարսի, Գառնիի և ուրիշները, մասամբ անվում են Սեանա լճից և լճի իջեցման հետևանքով նրանք պետք է ցամաքեն, կամ լավազուն ջրի ելքը պետք է պակասի: Այս հակասական կարծիքներն այս կամ այն աղբյուրի օգտագործման հետ կապված գործնական կոնկրետ խնդիրները լուծելիս առաջացրել են որոշ անվստահություն և սրել այդ հարցով զբաղվելու անհրաժեշտությունը, պահանջելով նրանք լուծում՝ Սեանա լճի իջեցման անկապակիս և պայմաններում:

Այդ հանգամանքի շնորհիվ Հայկական ՄՍՍԻ ԳԱ Ջրա-էներգետիկ Ինստիտուտում 1946 թվից Արարատյան դաշտի որոշ աղբյուրների վրա կազմակերպվեցին սիստեմատիկ դիտողություններ: Այդ աղբյուրների թվում առաջին հերթին Ռնդամալ-Մաքրավան (Ախտալի շրջան) աղբյուրներն էին, որոնք, անկասկած, կապված էին Սեանա լճի հետ:

Առանձին աղբյուրների ջրի ելքի և աղբի պարունակության փոփոխության վերաբերյալ կատարված 3 տարվա (1946—48 թ.թ.) դիտողություններով պարզված է, որ Սեանա լճի մակարդակը 2,5—3 մետր իջեցնելու հետևանքով լճից ֆիլտրացումն զգալի կերպով պակասել է: Ֆիլտրացման նվազումն այս կամ այն աստիճանով արտահայտվել է Ռնդամալ-Մաքրավան խմրի բոլոր աղբյուրների վրա, բացի մեկից՝ Ալազանի աղբյուրից, որի ելքն աճել է Հրազդան (Ջանդու) գետից եղած ֆիլտրացման շնորհիվ: Լճի մակարդակի իջեցումն զգալիորեն անդրադարձավ այդ խմրի ամենամեծ աղբյուրի՝ Ջկան-Ջրաղացի ելքի վրա, որը պակասեց մոտ 30 տոկոսով: Սեանա լճի վրա մշտական ջուրընդունելի շահագործման հետևանքով լճից ջրի ելքի ավելացման կապակցությամբ անմիջական օգտագործման համար մատչելի երեք աղբյուր մնաց, որոնցից երկուսը Ռնդամալ գյուղում (Ջկան-Ջրաղացի և Աղբյուրներ 11), իսկ մեկը՝ Ախարբեկյան (Գարվանսարա) գյուղում: Նշված երեք աղբյուրներից ամենամեծը Ջկան-Ջրաղացի աղբյուրն է, որը գործնական կոնկրետ լուծելիս պետք է առաջադրվի որպես ջրամատակարարման հիմնական աղբյուր:

Ֆիլարացումը լճից տեղի ունի բարձր հորիզոններից, և ոչ թե խորքերից և նրա մակարդակի որոշ իջեցումից հետո պետք է դադարի: Ինչպես ցույց են տվել մի շարք տարիների գիտողությունները, Սեանա լճի մակարդակի իջեցումն Արարատյան դաշտի հիմնական աղբյուրների ելքի և քիմիական բաղադրության վրա չանդրադարձավ, որը մի ավելորդ անդամ ապացուցում է Սեանա լճի հետ եղած կապի բացակայությունը:

Е. Д. Сафаров

Аналитический способ выражения кривых обеспеченности

После Великой Октябрьской социалистической революции по многим речным бассейнам Советского Союза собран большой материал наблюдений. В частности, в Армянской ССР все значительные реки охвачены гидрометрической сетью. За все время существования соответствующих станций накоплено большое количество данных наблюдений, обработка которых дает материал, характеризующий режим рек, озер и родников.

В настоящее время материал наблюдений недостаточно систематизируется, поэтому затрудняется его использование для обобщений, необходимых для целей проектирования гидроустановок. Причиной такого положения является недостаточная разработанность соответствующей методики.

Для данной цели имеет большое значение получение аналитического выражения кривых обеспеченности. Для энергетических расчетов также имеет большое значение получение аналитического выражения кривых продолжительности электрических нагрузок.

Настоящая работа посвящена вопросу получения аналитического выражения кривых обеспеченности расходов рек и кривых продолжительности электрических нагрузок.

В практике гидроэнергоспроектирования различают два способа осреднения многолетних данных по расходам воды [1]:

1. кривая обеспеченности средней продолжительности суточных расходов и

2. кривая обеспеченности средних суточных расходов воды.

Первая из этих кривых строится за весь многолетний ряд лет или, если имеются кривые продолжительности за отдельные годы, то осреднение производится по продолжительности, т. е. определяется средняя абсцисса для ряда заданных расходов воды.

Вторая кривая строится с осреднением по расходам воды, т. е. по ординатам для ряда заданных продолжительностей (или обеспеченностей).

Очевидно, что кривая обеспеченности средней продолжительности суточных расходов воды позволяет значительно точнее определять возможную по воде выработку гидроэлектрических станций,

чем кривая обеспеченности средних суточных расходов воды. Однако, для построения кривых такого вида требуется много времени и труда.

Обычно кривые обеспеченности строят в абсолютных величинах, или в величинах, представляющих из себя отношение данной величины к средней. Однако, как показывает опыт, построение кривых обеспеченности подобным способом приводит к большому разнообразию в очертаниях кривых. Для иллюстрации сказанного на рис. 1 приведены кривые средней многолетней продолжительности расходов воды основных рек Армянской ССР.

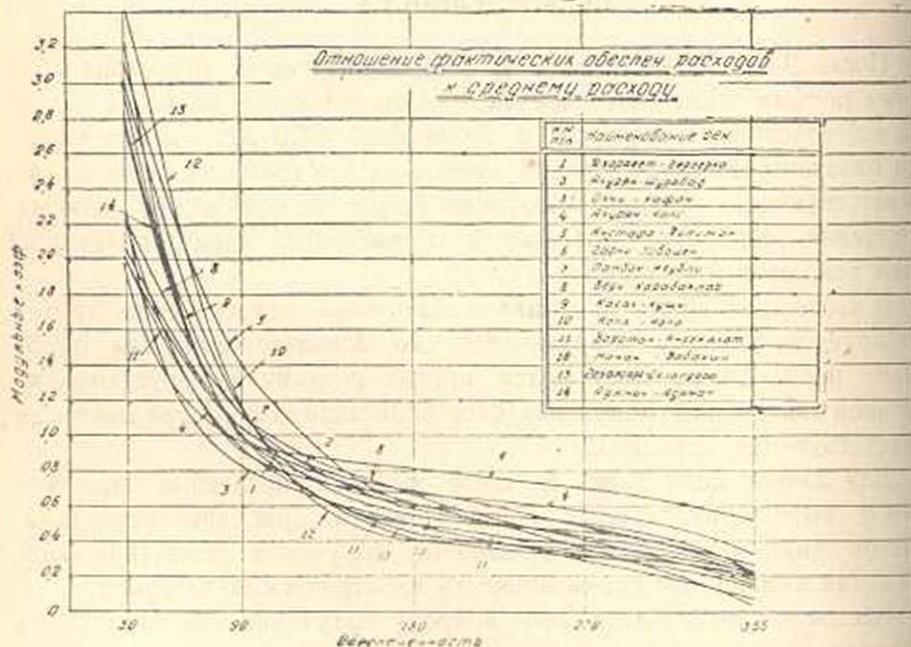


Рис. 1

Рис. 1 показывает, что кривые обеспеченности располагаются произвольно, безо всякой закономерности, что затрудняет анализ. Это разнообразие очертаний сильно зависит от крайних значений расходов.

В последнее время опубликовано много материалов, характеризующих режим большинства водотоков СССР [2,3,4], в которых приводятся обеспеченные расходы в течение одного месяца и больше. По этой причине оказывается удобным, как это сделано в настоящей статье, брать в качестве базиса приведения не средний расход, как это делалось до сих пор, а расход, обеспеченный 30 дней в году, т. е. делить все ординаты кривой обеспеченности не на средний расход, а на расход, обеспеченный только один месяц в году.

Такие кривые приведены на рис. 2.

Сравнивая рисунки 1 и 2, замечаем, что:

- а) пользование кривыми обеспеченности, приведенными на рис. 2, гораздо проще;
- б) легко оценивается зарегулированность расходов;
- в) дается возможность сравнивать кривые между собою для оценки различных характерных расходов; наконец,
- г) благодаря тому, что кривые на рис. 2 располагаются в систематизированном виде, имеется возможность представить их аналитически, без большой затраты труда, как это требуют другие способы.

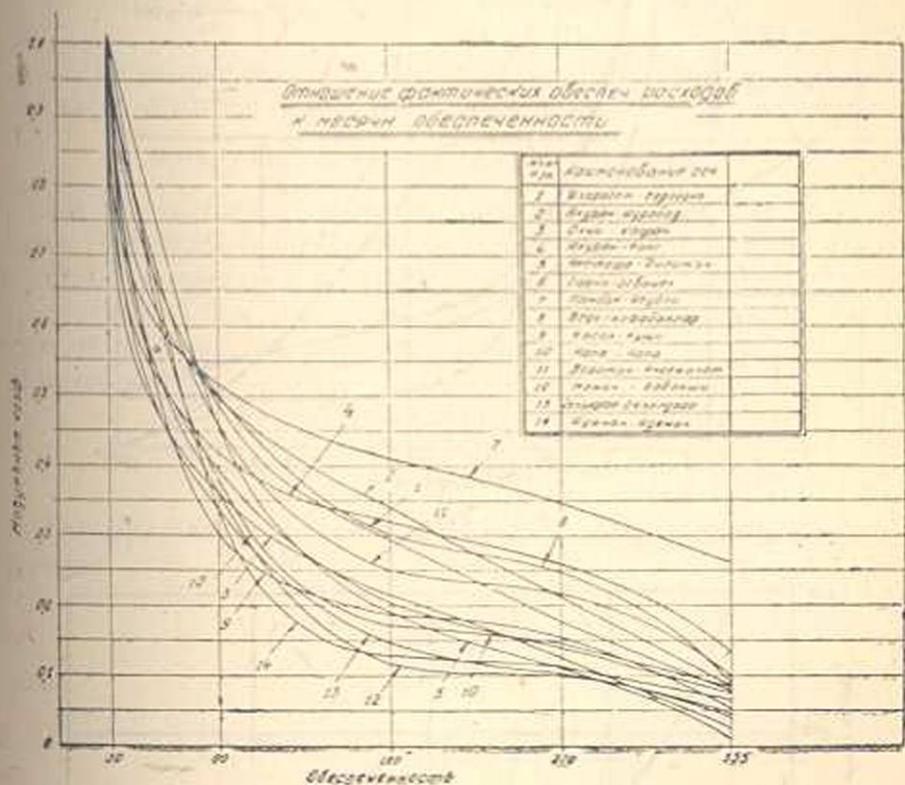


Рис. 2

Это последнее обстоятельство очень важно, так как имея аналитическое выражение кривых обеспеченности, можно обобщить все водохозяйственные расчеты, имея в виду, что дифференцирование кривых обеспеченности приводит к кривым распределения, а интегрирование — к кривой энергии. Следовательно, имея аналитическое выражение для кривых обеспеченности, можем подвести математическую основу под все водохозяйственные расчеты, связанные с проектированием гидростановок.

Перспектива возможности упрощения и уточнения гидроэнергетических расчетов путем аналитического представления кривых обеспеченности явилась причиной появления многочисленных попыток подбора подходящих уравнений.

*Приближенные эмпирические кривые обеспеченности сумочных расходов,
построенные по аналитическим формулам*

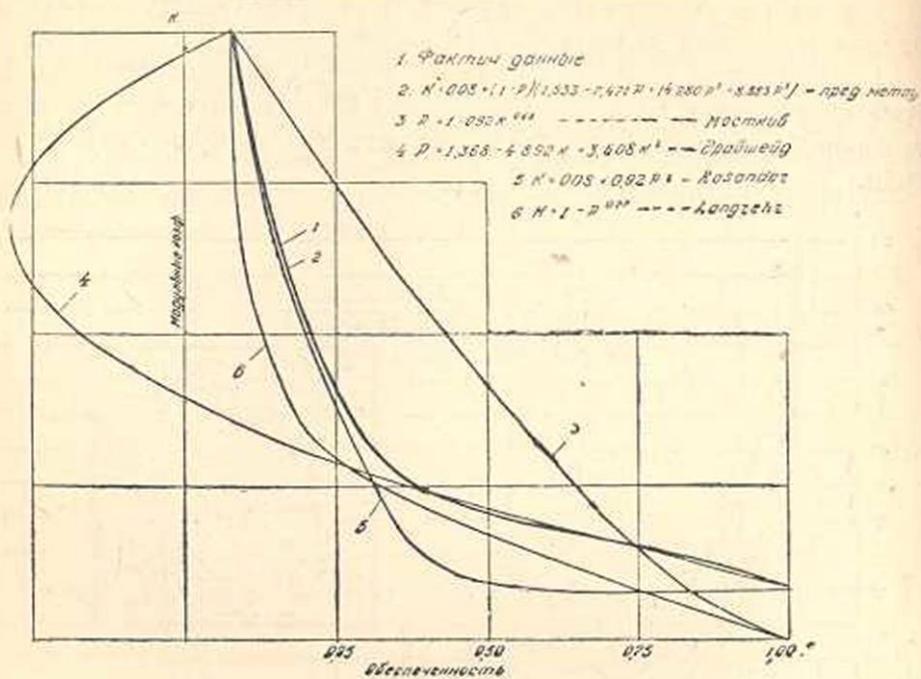


Рис. 3

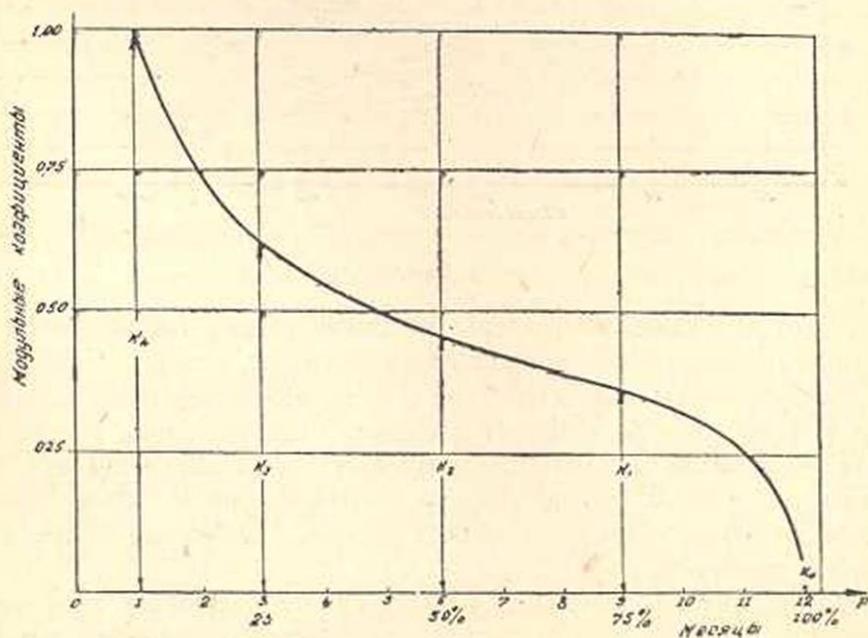


Рис. 4

Для получения ясного представления о соответствии построенных по этим уравнением кривых фактическим данным, на рис. 3 приведены кривые, вычисленные по некоторым из существующих формул. Как видно, ни одна из них не дает удовлетворительного совпадения теоретической кривой с фактической кривой обеспеченности.

Исходя из сказанного, ниже предлагается иной подход к аналитическому представлению кривых обеспеченности, дающий достаточно точное совпадение указанных кривых.

Рассмотрим рис. 4, на котором изображена кривая обеспеченности.

Как не трудно заметить, на основании этой кривой, мощность водотока можно представить уравнением вида:

$$N = k_0 + f(t) = k_0 + (1-p) (a + bp + cp^2 + \dots + cp^n) \quad (1)$$

Для определения постоянных коэффициентов a, b, c, \dots составим столько уравнений, сколько имеем неизвестных параметров. Предварительные вычисления показали, что достаточно точные результаты получаются при использовании всего трех или четырех (в зависимости от требуемой точности) членов ряда, т. е. ур. (1) представляется в виде

$$N = k_0 + (1-p) (a + bp + cp^2), \quad (2)$$

$$N = k_0 + (1-p) (a + bp + cp^2 + dp^3). \quad (3)$$

Для определения параметров по выражению (2) составляем три уравнения:

$$\text{при } p = \frac{1}{12}; p = \frac{1}{4} \text{ и } p = \frac{1}{2},$$

а именно:

$$\frac{N - k_0}{1-p} = \frac{12}{11} (1 - k_0) = a + \frac{b}{12} + \frac{c}{144}, \quad (4)$$

$$\frac{N - k_0}{1-p} = \frac{4}{3} (k_2 - k_0) = a + \frac{b}{4} + \frac{c}{16},$$

$$\frac{N - k_0}{1-p} = 2(k_1 - k_0) = a + \frac{b}{2} + \frac{c}{4},$$

где k_1 — модульный коэффициент при $p = \frac{1}{2}$,

k_2 — тоже при $p = \frac{1}{4}$

Решив уравнение (4) относительно a, b, c , получим:

$$\begin{aligned} a &= 1,9636 - 1,0303 k_0 + 0,4 k_1 = 1,3333 k_2; \\ b &= 11,7818 - 0,4849 k_0 + 6,4 k_1 - 18,6667 k_2; \\ c &= 15,7091 - 2,9091 k_0 + 19,2 k_1 - 32,0000 k_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Определив значения величин a , b и c из уравнения (5) и подставив в (2), находим аналитическое выражение кривой продолжительности.

Для определения значения a , b и c по уравнениям (5) необходимо знать величины k , k_1 и k_2 . Эти величины берем из кривой обеспеченности при

$$p=1, p=\frac{1}{2} \text{ и } p=\frac{1}{4}$$

Из выражений (2) и (3) видим, что при $p=1$; $k=k_0$, т. е. получаем минимальную ординату кривой продолжительности, а при

$$p=\frac{1}{12} \text{ получаем } k=1,$$

Таким образом, вычисленная кривая продолжительности с фактической кривой будет иметь 4 общих точки:

$$\text{при } p=\frac{1}{12}, p=\frac{1}{4}, p=\frac{1}{2} \text{ и } p=1.$$

В пределах данных интервалов эти кривые могут несколько расходиться, но этим можно пренебречь при ориентировочных расчетах.

Если требуется, чтобы вычисленные кривые более точно совпадали с фактическими, то необходимо пользоваться выражением (3).

Для определения параметров выражения (3) необходимы 4 уравнения. Эти уравнения составлены так, чтобы удовлетворить координатам.

$$p=\frac{1}{12}, p=\frac{1}{4}, p=\frac{1}{2}, p=\frac{3}{4}, p=1,$$

т. е. уравнения будут:

$$\frac{12}{11}(1-k_0)=a+\frac{b}{12}+\frac{c}{144}+\frac{d}{1728};$$

$$\frac{4}{3}(k_3-k_0)=a+\frac{b}{4}+\frac{c}{164}+\frac{d}{64}; \quad (6)$$

$$2(k_2-k_0)=a+\frac{b}{2}+\frac{c}{4}+\frac{d}{8};$$

$$4(k_1-k_0)=a+\frac{3}{4}b+\frac{9}{16}c+\frac{27}{64}d.$$

Решив уравнение (6) относительно параметров a , b , c и d , получим:

$$\begin{aligned}
 a &= 2,2091 - 0,9091k_0 - 0,50k_1 + 1,20k_2 - 2,00k_3; \\
 b &= 16,2 - 2,6667k_0 + 9,00k_1 - 20,80k_2 + 30,6667k_3; \\
 c &= 35,5454 + 6,7880k_0 - 40,00k_1 + 83,20k_2 - 85,3333k_3; \\
 d &= 23,5636 - 11,636k_0 + 48,00k_1 - 78,80k_2 + 64,00k_3;
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Беря значения k_0, k_1, k_2 и k_3 по кривым продолжительности (или обеспеченности) при $p = \frac{1}{4}$; $p = \frac{1}{2}$; $p = \frac{3}{4}$ и $p=1$,

определим значения a, b, c и d . Подставив их в (3), получим аналитическое выражение кривой обеспеченности, которое можно использовать для точных расчетов, так как здесь имеем 5 общих точек с кривой фактических данных.

На рис. 3 приведены как фактические кривые продолжительности, так и кривые, построенные по предполагаемым формулам.

Рисунки 2 и 3 дают ясное представление о преимуществах предлагаемого способа построения кривых обеспеченности. Очевидно, что аналогичным способом можно придать аналитический вид кривым обеспеченности среднегодовых расходов при различных значениях коэффициентов вариации и асимметрии. [5]. Ниже дается способ аналитического выражения этих кривых. Однако, в этом случае целесообразно в качестве базиса приведения брать не расход месячной, а 5% обеспеченности. Тогда на основании таблицы вероятностей (6) можно составить следующую таблицу для $C_s = 2C_v$:

Таблица 1

Обес. период в % р	Коэффициент вариации									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,10
5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25	91,12	84,22	76,57	71,15	65,89	61,23	57,03	53,15	49,20	46,26
50	85,22	73,11	62,78	54,65	47,37	41,15	35,77	31,01	26,58	23,10
75	79,57	63,63	50,81	40,95	32,72	26,05	20,58	16,23	12,43	9,61
95	71,88	51,33	36,38	25,50	17,65	11,79	7,72	4,86	2,92	1,70

На основании этой таблицы составлен рис. 5, имеющий вид, аналогичный рис. 2. Это дает право и в данном случае при вычислении параметров a, b, c и d , поступать так же, как и в вышеописанном случае. Для этой цели уравнению придаем следующий вид:

$$N = k_0 + (1 - \alpha p) [a + bp + cp^2 + dp^3] \tag{8}$$

Здесь $\alpha = \frac{1}{p_0}$, где

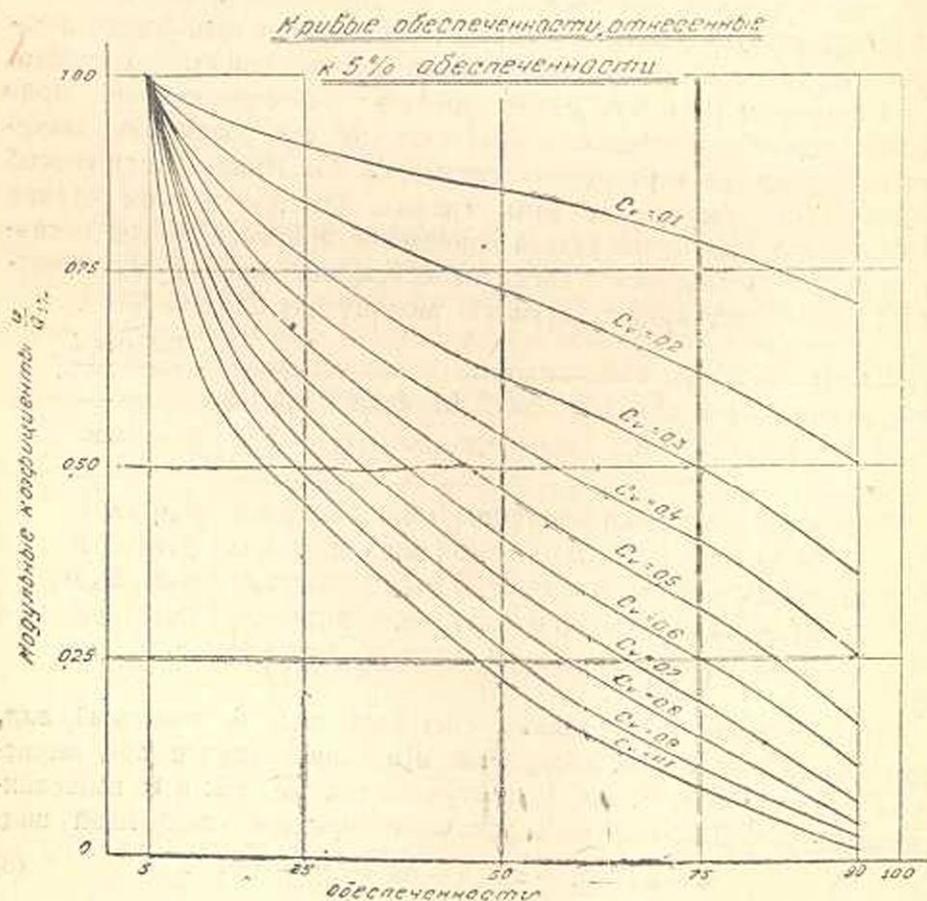
p_0 — обеспеченность, соответствующая модульному коэффициенту k_0 .

Для вычисления параметров a , b , c и d берем для p значения:

$$\frac{1}{20}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2} \text{ и } \frac{3}{4}.$$

Тогда вместо уравнения (7) получим:

$$\begin{aligned} a &= 1.57074(1 - k_0) - 1.01786(k_3 - k_0) + 0.70370(k_2 - k_0) - \\ &\quad - 0.33929(k_1 - k_0); \\ b &= 11.51896(1 - k_0) + 23.75000(k_3 - k_0) - 17.82716(k_2 - k_0) + \\ &\quad + 8.82142(k_1 - k_0); \\ c &= 25.13227(1 - k_0) - 70.57143(k_3 - k_0) + 78.81482(k_2 - k_0) - \\ &\quad - 43.42857(k_1 - k_0); \\ d &= 16.75485(1 - k_0) + 54.28571(k_3 - k_0) - 75.06172(k_2 - k_0) + \\ &\quad + 54.2857(k_1 - k_0). \end{aligned} \quad (9)$$



На основании уравнения (9) и таблицы (1) или рис. 4 при данных коэффициентах вариации можно определить параметры a , b , c и d , что и сделано для случая, когда $C_s = 2C_v$. Эти данные приведены в таблице 2.

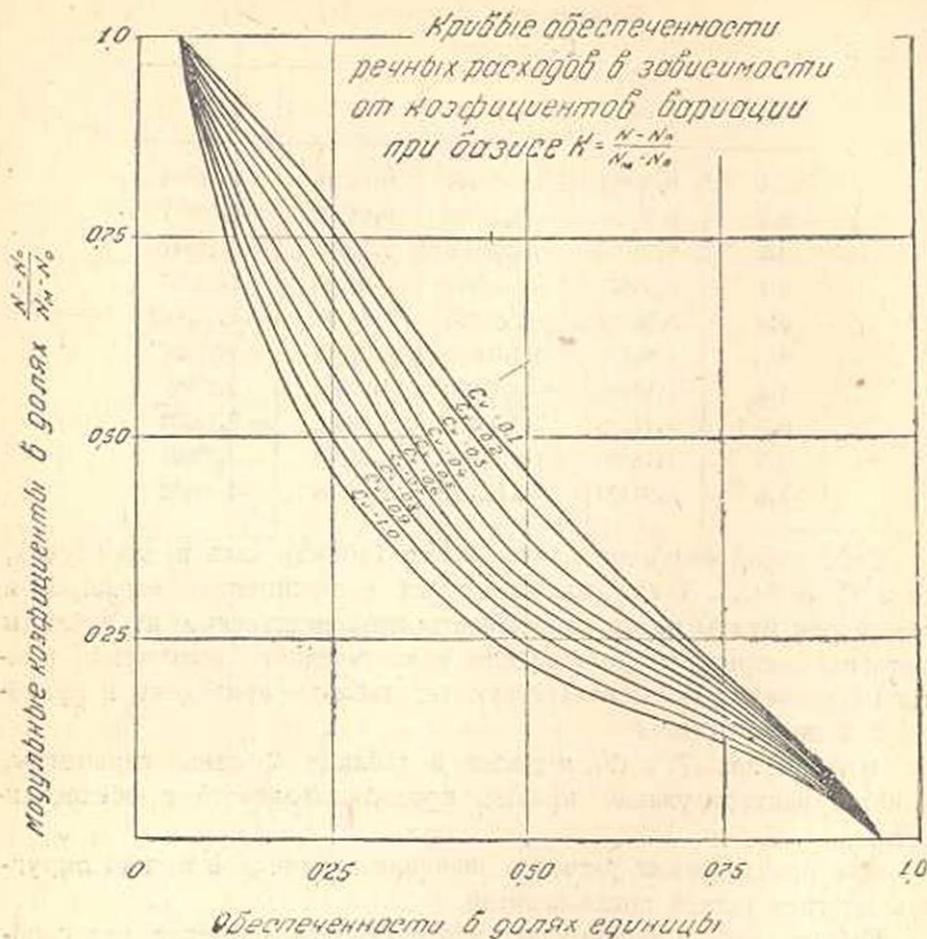


Рис. 6

По данным этой таблицы построен рис. 6. Если функцию взять в виде $p = f(k)$, то уравнение напишется в следующем виде:

$$p = p_0 + (1 - k)\alpha + ak + bk^2 + ck^3; \quad (10)$$

при $p_0 = 0,05$ $p = 0,95$ $k = 0$.

Тогда из выражения

$$0,95 = 0,05 + (1 - 0)\alpha \text{ получим } \alpha = 0,9.$$

Следовательно, уравнение окончательно примет вид:

$$p = 0,05 + (1 - k)(0,90 + ak + bk^2 + ck^3). \quad (10')$$

Для определения значения величин a , b и c составим третье уравнение для

$$k_1 = \frac{1}{4}, \quad k_2 = \frac{1}{2} \quad \text{и} \quad k_3 = \frac{3}{4}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{(4p_1 - 2,9)4}{3} &= a + \frac{b}{4} + \frac{4c}{16} \\ \frac{(2p_2 - 1)6}{3} &= a + \frac{b}{2} + \frac{c}{14} \\ \frac{(2p_2 - 1)6}{3} &= a + \frac{b}{2} + \frac{c}{4} \\ \frac{(4p_3 - 1,1)4}{3} &= a + \frac{3b}{4} + \frac{9c}{16} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Решив эти уравнения относительно a , b и c , получим:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{3} [48p_1 - 36p_2 + 16p_3 - 21,2]; \\ b &= \frac{1}{3} [160p_1 - 192p_2 + 96p_3 - 46,4]; \\ c &= \frac{1}{3} [128p_1 - 192p_2 + 128p_3 - 32]. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь, как отмечено выше, p_1 будет обеспеченность, соответствующая $k = \frac{1}{4}$.

При $k = \frac{1}{2}$ и $\frac{3}{4}$ обеспеченности будут p_2 и p_3 .

На основании выражения (12) и таблицы 3 вычислены параметры a , b и c для кривых обеспеченности при $C_s = 2C_v$ (табл. 4).

Таблица 4

C_v	a	b	c
0,1	0,780	-2,325	1,002
0,2	0,888	-3,541	2,347
0,3	1,037	-5,131	4,083
0,4	0,890	-5,195	4,373
0,5	0,667	-5,088	4,563
0,6	0,196	-3,861	3,691
0,7	-0,228	-2,827	3,029
0,8	-0,739	-1,440	1,963
0,9	-1,287	-0,053	1,168
1,0	-1,431	+1,408	-0,192

Данные таблицы 4 дают возможность непосредственно вывести аналитическое выражение для кривых продолжительности.

Как отмечено выше,

$$k = \frac{k' - K_{\infty 0/a}}{K_{0/a} - K_{\infty 0/a}},$$

где k' — модульный коэффициент, равный $\frac{N}{N_0}$, N_0 — минимальный член рассматриваемого ряда.

$K_{0.95}$ -модульный коэффициент, соответствующий 5% обеспеченности, а $K_{0.05}$ — то же при 95% обеспеченности.

Наконец, аналогичным образом выразим аналитически кривые продолжительности электрических нагрузок в зависимости от числа часов использования.

Графическое представление, заимствованное у Музиля, дано на рис. 7.

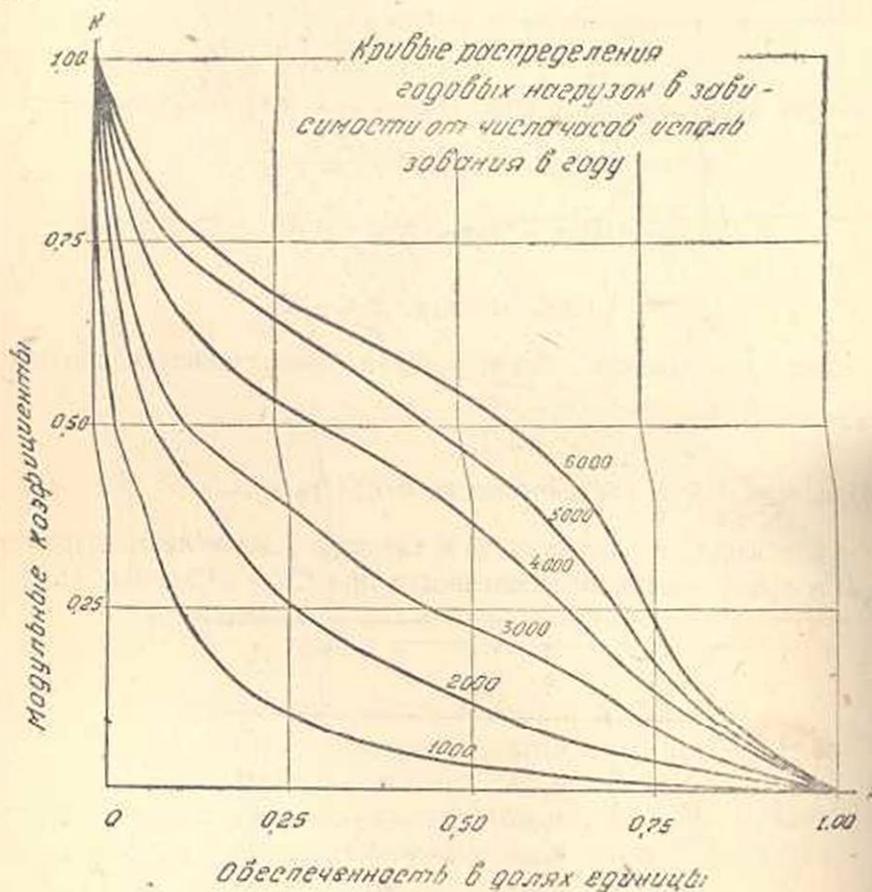


Рис. 7

Аналитическое выражение кривых, представленных на рис. 7, может быть дано в виде:

$$p = (1 - k)(1 + ak + bk^2 + ck^3), \quad (13)$$

при $k=1$, $p=0$, а при $k_0=0$, $p=1$, что соответствует граничным условиям.

Для определения значений коэффициентов a , b , и c составим три уравнения:

$$\left[\frac{p_1}{1 - k_1} - 1 \right] \frac{1}{k_1} = a + bk_1 + ck_1^2, \\ \left[\frac{p_2}{1 - k_2} - 1 \right] \frac{1}{k_2} = a + bk_2 + ck_2^2, \quad (14)$$

$$\left[\frac{p_3}{1-k_3} - 1 \right] \frac{1}{k_3} = a + bk_3 + ck_3^2.$$

Решая эти уравнения относительно a , b и c , получим:

$$a = \frac{1}{3} (48 p_1 - 36 p_2 + 16 p_3 - 22),$$

$$b = \frac{1}{3} (160 p_1 - 192 p_2 + 96 p_3 - 48), \quad (15)$$

$$c = \frac{1}{3} (128 p_1 - 192 p_2 + 128 p_3 - 32).$$

Эти значения отличаются от таковых (12) только свободными членами.

Координаты точек кривых по рис. 7 приводим в нижеследующей таблице:

Таблица 5

К	Число часов в году					
	1000	2000	3000	4000	5000	6000
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,25	0,095	0,260	0,445	0,630	0,700	0,790
0,50	0,030	0,080	0,125	0,315	0,460	0,575
0,75	0,005	0,020	0,040	0,065	0,110	0,155
1,00	0	0	0	0	0	0

На основании уравнения (15) и таблицы 5 определим параметры a , b и c уравнения (13), которые сведены в таблицу 6.

Таблица 6

г	a	b	c
1000	-6,147	12,693	-8,320
2000	-4,027	6,613	-3,840
3000	-1,500	-1,013	2,027
4000	-0,687	-1,920	-1,120
5000	-0,967	4,587	-5,547
6000	-0,767	5,703	-7,293

Эти коэффициенты дают возможность непосредственно написать аналитическое выражение для кривых рис. 7.

Очевидно, что заранее можно подсчитать параметры для любого числа часов использования.

На основании изложенного можно прийти к выводу о целесообразности внедрения предлагаемого способа в практику водохозяйственных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егизаров И. В.*—Гидроэлектрические установки, ч. 1. Изд. 3, глава V, 1934.
2. *Соколовский Д. Л.*—Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС. Тр. НИУ УГМС СССР, сер. IV, вып. 36, Гидрометиздат, 1946.
3. *Урмаев В. А.*—Обеспеченность в году расходов рек Европейской части СССР. Тр. НИУ УГМС, сер. IV, вып. 1. Гидрометиздат, 1941.
4. *Зайков Б. Д.*—Средний годовой сток и его распределение на территории СССР. Тр. НИУ УГМС, сер. IV, вып. 24. Гидрометиздат, 1946.
5. *Տաֆարով Ե. Ժ.*—Кривые распределения и обеспеченности, Ереван, 1947.
6. *L. Musil*—Die Wirtschaftlichkeit der Energiespeicher ung für Elektrizitätswerke Berlin, 1930.

Ե. Ժ. Տաֆարով

ԱՊԱՀՈՎՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐԵՐԻ ԱՐՏԱՀԱՅՏՄԱՆ ԱՆԱԼԻՏԻԿ ԵՂԱՆԱԿ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աշխատանքում առաջարկված է ապահովության կորերի կառուցումը ոչ թե բոլոր ելքերը միջին ելքի վրա բաժանելու միջոցով, ինչպես արվում էր մինչ այժմ, այլ բաժանելով այն ելքի վրա, որը տարվա ընթացքում ապահովված է միայն մեկ ամիս, կամ 5⁰/₁₀₀ ապահովված ելքի վրա: Այդպիսով ննարավոր է դառնում պարզեցնել հաշվումները, հստակ կանոնավորության աստիճանը և ապահովության կորերն արտահայտել անալիտիկորեն: Վերջինս չափազանց կարևոր է, որովհետև դրա միջոցով կարելի է ընդհանրացնել ջրատնտեսական բոլոր հաշվումները, քանի որ ապահովության կորերի դիֆերենցումը բերում է բաշխման կորերի, իսկ ինտեգրումը՝ էներգիայի կորերի: Հետևապես, այդ դեպքում հիդրոէկոլոգիաների պրոնեկտման հետ կապված բոլոր ջրատնտեսական հաշվումները մաթեմատիկական հիմնավորում կստանան:

Հիդրոէներգետիկ հաշվումների ննարավոր պարզեցման և ճշաման հեռանկարը համապատասխան հավասարումներ ընարելու բազմամիջվ փորձերի առիթ ծառայեց: Սակայն այդ հավասարումներից ոչ մեկը չավելց բավարար լուծում (տես նկ. 3):

Հոգվածում առաջարկված է գետերի օրական ելքի ապահովության կորերի անալիտիկ արտահայտման նոր մեթոդ, որը բերում է (1) կամ (10) ախյի հավասարումների: Հոգվածում արված է նաև հիշյալ հավասարումների պարամետրների որոշման անալիտիկ եղանակը (հավասարում 5): Բացի դրանից, կապ է ստեղծված հավասարումների պարամետրների և վարիացիայի ու անսիմետրիկության գործակիցների միջև (տես հավելվածը):

Աշխատանքում արված են նաև էլեկտրական բևեռավորվածությունների ապահովության կորերի հավասարումներն անալիտիկ արտահայտությունը (հավասարում 13) և այդ հավասարումների պարամետրների արժեքները՝ կախված տարեկան բևեռավորվածության ժամերի քանակից:

ТАБЛИЦА ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ (8)

Для различных значений коэффициентов вариации и асимметрии

$$C_V = 0,05$$

C_s / C_V	-40	-25	-5	0	2	7	17	27	32	52
а	-0,093	-0,074	-0,052	-0,072	-0,090	-0,106	-0,203	-0,560	-0,598	-0,703
б	0,181	0,171	0,162	0,161	0,163	0,171	0,740	1,433	1,313	1,570
с	-0,260	-0,231	-0,202	-0,252	-0,310	-0,358	-1,190	-1,803	-1,829	-1,605
д	0,260	0,231	0,202	0,252	0,310	0,358	1,790	1,803	1,829	1,605
k_0	0,887	0,897	0,913	0,917	0,918	0,921	0,926	0,931	0,934	0,938

$$C_V = 0,10$$

C_s / C_V	-20	-8	-2	0	2	4	6	8	11	15
а	-0,115	-0,183	-0,270	-0,284	-0,413	-0,471	-0,675	-0,730	-0,789	-0,940
б	0,443	0,339	0,327	0,254	0,310	0,466	0,786	0,965	1,422	1,812
с	-1,150	-0,782	-0,664	-0,410	-0,407	-0,433	-0,632	-0,935	-1,584	-1,746
д	1,150	0,782	0,664	0,410	0,407	0,433	0,632	0,935	1,584	1,746
k_0	0,782	0,809	0,828	0,834	0,841	0,843	0,850	0,853	0,861	0,868

$C_v = 0,15$

П-рм	C_s / C_v		-2	-8	0	2	3	5	8	10	12
	-16	-8									
a	-0,355	-0,366	-0,365	-0,364	-0,564	-0,653	-1,077	-1,280	-1,156	-1,393	-1,628
b	0,360	0,345	0,330	0,314	0,458	0,458	1,881	1,725	2,114	1,701	3,361
c	-0,240	-0,289	-0,317	-0,200	-0,312	-0,312	-1,378	-1,533	-2,312	-3,150	-3,657
d	0,240	0,289	0,317	0,200	0,312	0,312	1,378	1,533	2,312	3,150	3,657
k_0	0,570	0,701	0,740	0,753	0,367	0,367	0,775	0,782	0,796	0,804	0,813

 $C_v = 0,20$

П-рм	C_s / C_v		-2	-8	0	2	4	6	8	11	15
	-16	-8									
a	-0,133	-0,073	-0,050	-0,761	-0,901	-1,303	-1,534	-1,939	-2,358	-3,757	
b	1,831	2,468	3,047	0,332	0,572	1,466	4,638	4,797	5,057	9,303	
c	-1,813	-3,484	-6,643	-0,195	-0,376	-1,192	-4,478	-4,661	-5,344	-10,428	
d	1,813	3,484	6,643	0,195	0,376	1,192	4,478	4,661	5,344	10,428	
k_0	0,572	0,605	0,646	0,669	0,693	0,703	0,721	0,730	0,756	0,764	

 $C_v = 0,25$

П-рм	C_s / C_v		-2	-5	0	2	3	4	5	8	10
	-8	-5									
a	-1,007	-0,859	-0,805	-1,086	-1,146	-1,216	-1,285	-1,826	-2,087	-4,009	
b	3,899	2,419	3,114	0,970	1,191	1,601	2,089	3,167	3,762	8,867	
c	-8,483	-3,733	-6,209	-1,105	-1,194	-1,824	-2,460	-3,404	-3,982	-9,599	
d	8,483	3,733	6,209	1,105	1,194	1,824	2,460	3,404	3,982	9,599	
k_0	0,503	0,535	0,559	0,603	0,627	0,640	0,652	0,668	0,708	0,722	

$C_v = 0,30$

П-ры	C_u / C_v									
	-8	-5	-2	0	2	3	4	5	6	8
a	-3,178	-2,107	-1,429	-1,067	-1,294	-1,668	-2,113	-2,812	-3,361	-3,485
b	4,609	3,146	1,252	0,367	1,286	1,935	3,349	4,957	7,097	6,731
c	-5,875	-3,428	-1,782	-0,366	-1,382	-3,873	-6,538	-6,538	-6,787	-7,949
d	-5,875	-3,428	1,782	0,366	1,382	3,873	6,538	6,538	6,787	7,949
k_0	0,386	0,456	0,489	0,523	0,562	0,578	0,596	0,618	0,638	0,670

 $C_v = 0,35$

П-ры	C_u / C_v									
	-8	-5	-2	0	2	3	4	5	6	8
a	-2,748	-1,920	-1,810	-0,303	-1,943	-1,897	-1,876	-1,857	-1,807	-3,299
b	9,822	5,185	2,570	0,954	2,090	2,618	3,270	3,405	4,353	7,520
c	-17,023	-10,125	-4,086	-1,087	-2,109	-2,675	-3,328	-4,522	-5,765	-8,706
d	17,023	10,125	4,086	1,087	2,109	2,675	3,328	4,522	5,765	8,706
k_0	0,361	0,384	0,422	0,459	0,502	0,538	0,588	0,571	0,601	0,631

 $C_v = 0,40$

П-ры	C_u / C_v									
	-8	-5	-2	0	2	3	4	5	6	7,5
a	-1,850	-1,351	-1,439	-2,034	-2,370	-2,615	-3,040	-2,887	-2,683	-1,999
b	7,475	2,783	0,605	3,161	2,902	4,937	6,363	5,172	3,882	2,294
c	-16,869	-6,914	-1,654	-6,145	-2,738	-5,650	-7,871	-3,375	-3,100	-2,294
d	16,869	6,914	1,654	6,145	2,738	5,650	7,871	3,375	3,100	2,294
k_0	0,300	0,321	0,358	0,394	0,445	0,476	0,500	0,528	0,549	0,578

$C_v = 0,45$

C_s / C_v	-6	-4	-2	0	1	2	3	4	5	6,5
а	-1,597	-1,735	-1,747	-2,022	-2,174	-2,708	-2,909	-3,028	-3,143	-2,241
б	2,943	2,012	0,779	1,053	1,115	3,534	4,341	5,228	5,549	3,599
с	-8,532	-5,055	-1,921	-1,205	-1,464	-4,138	-4,353	-5,403	5,903	-5,391
д	8,532	5,055	1,921	1,205	1,464	4,138	4,353	5,403	5,903	5,391
k_0	0,262	0,279	0,300	0,339	0,363	0,391	0,425	0,444	0,486	0,496

 $C_v = 0,50$

C_s / C_v	-6	-4	-2	0	1	2	3	4	5	6
а	-0,694	-0,647	-0,561	-2,535	-1,084	-2,953	-3,110	-3,201	-3,134	-2,487
б	4,108	3,973	1,777	1,893	0,995	3,072	3,666	3,578	1,923	1,631
с	-3,622	-3,175	-2,541	-1,690	-0,843	-3,128	-3,563	-2,990	-3,663	-1,404
д	3,622	3,175	2,541	1,690	0,843	3,128	3,563	2,990	3,663	1,404
k_0	0,214	0,231	0,248	0,290	0,311	0,342	0,378	0,403	0,443	0,496

 $C_v = 0,55$

C_s / C_v	-6	-4	-2	0	1	2	3	4	5	6
а	-1,500	-1,337	-1,069	-2,466	-3,318	-3,495	-3,455	-3,028	-3,049	-2,568
б	11,395	6,290	3,357	1,541	3,430	4,844	4,644	3,810	3,784	3,201
с	-13,620	-5,910	-3,127	-1,357	-3,013	-5,111	-4,938	-3,733	-3,698	-3,062
д	13,620	5,910	3,127	1,357	3,013	5,111	4,938	3,733	3,698	3,062
k_0	0,175	0,190	0,210	0,246	0,266	0,296	0,334	0,370	0,395	0,428

$C_v = 0,60$

П-ры	C_s/C_v	-6	-4	-2	0	1	2	2,5	3	4	5,5
a		-2,909	-2,449	-3,587	-3,597	-3,874	-4,781	-5,009	-5,344	-5,260	-5,520
b		6,995	4,415	4,226	2,986	4,707	8,195	9,270	10,873	11,907	10,901
c		-13,731	-10,261	-6,355	-3,583	-5,669	-8,402	-10,069	-13,079	-14,204	-12,197
d		13,731	10,261	6,355	3,583	5,669	8,402	10,069	13,079	14,204	12,197
k_0		0,148	0,166	0,178	0,204	0,226	0,253	0,264	0,281	0,319	0,374

 $C_v = 0,65$

П-ры	C_s/C_v	-5	-3	-2	0	1	2	2,5	3	4	5,5
a		-5,132	-4,720	-2,370	-4,188	-4,330	-4,682	-4,586	-4,461	-3,749	-3,029
b		8,710	7,078	4,675	4,016	4,453	6,758	7,838	7,727	6,465	4,751
c		-17,364	-11,084	-7,133	-3,435	-4,502	-6,766	-7,890	-7,895	-6,998	-5,114
d		17,364	11,084	7,133	3,435	4,502	6,766	7,890	7,895	6,998	5,114
k_0		0,137	0,146	0,155	0,175	0,192	0,216	0,228	0,241	0,286	0,323

 $C_v = 0,70$

П-ры	C_s/C_v	-5	-3	-2	0	1	2	2,5	3	4	5
a		-5,485	-5,076	-4,616	-4,687	-5,248	-5,100	-5,019	-4,872	-4,372	-3,377
b		9,648	8,030	7,429	3,636	5,581	6,183	6,827	7,669	6,572	5,113
c		-20,850	-13,335	-8,239	-3,268	-5,415	-6,157	-6,520	-7,866	-6,809	-5,313
d		20,850	13,335	8,239	3,268	5,415	6,157	6,520	7,866	6,809	5,313
k_0		0,096	0,110	0,119	0,143	0,160	0,182	0,192	0,204	0,220	0,279

$C_v =$

C^*/C_v	-5	-3	-2	0
П-ры				
a	-8,654	-5,207	-4,838	-5,397
b	14,964	11,267	9,278	8,125
c	-17,008	-12,773	-10,298	-8,226
d	17,008	12,773	10,298	2,226
k_0	0,072	0,088	0,098	0,120

 $C_v =$

C_s/C_v	-4	-3	-2	0
П-ры				
a	-5,850	-5,563	-5,337	-7,000
b	9,821	9,562	9,652	8,577
c	-12,338	-10,487	-8,623	-6,657
d	12,338	10,487	8,623	6,657
k_0	0,067	0,072	0,080	0,097

 $C_v = 0$

C_v/C_v	-4	-3	-2	0
П-ры				
a	-6,639	-6,307	-6,099	-7,834
b	13,476	11,149	10,146	12,165
c	-18,165	-13,429	-11,150	-11,485
d	18,165	13,429	11,150	11,485
k_0	0,056	0,061	0,065	0,081

0,75

1,0	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
-5,891	-5,705	-5,557	-5,292	-4,546	-3,612
8,773	9,175	8,776	8,316	6,897	5,693
-8,384	-7,784	-8,616	-8,424	-7,009	-6,051
8,384	7,784	8,616	8,424	7,009	6,051
0,132	0,152	0,162	0,173	0,203	0,246

0,80

1,0	2,0	2,5	3,0	4,0	4,5
-7,033	-6,508	-6,214	-5,964	-6,539	-9,610
11,735	10,591	10,247	9,933	11,191	16,634
-12,048	-10,684	-10,332	-10,008	-12,230	-17,567
12,048	10,684	10,332	10,008	12,230	17,567
0,110	0,125	0,134	0,141	0,174	0,196

0,85

1,0	2,0	2,5	3,0	4,0	4,5
-7,216	-6,676	-6,131	-6,039	-5,502	-5,146
9,691	10,169	9,723	9,305	8,490	7,949
-7,872	-9,993	-9,623	-9,305	-8,516	-8,013
7,872	9,993	9,623	9,305	8,516	8,013
0,090	0,108	0,110	0,119	0,143	0,158

$C_v = 0,90$

П-рп	C_s / C_v	-4	-3	-2	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
a		-8,457	7,897	-7,331	-7,867	-7,791	-7,659	-7,392	-7,256	-6,401	-6,299
b		12,966	12,568	10,850	8,779	10,406	10,485	10,115	10,112	10,139	9,981
c		-21,076	-15,576	-9,829	-5,506	-8,468	-10,564	-11,256	-10,782	-10,358	-10,182
d		21,076	15,576	9,829	5,506	8,468	10,564	11,256	10,782	10,358	10,182
k_0		0,040	0,043	0,049	0,053	0,073	0,078	0,082	0,089	0,096	0,111

 $C_v = 0,95$

П-рп	C_s / C_v	-4	-3	-2	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
a		-10,042	-9,505	-9,002	-8,171	-8,801	-8,335	-8,037	-7,827	-7,518	-6,895
b		11,403	10,966	10,179	9,044	10,630	8,473	10,618	9,149	10,636	10,645
c		-14,386	-11,980	-11,137	-5,688	-10,606	-11,660	-12,960	-12,524	-11,113	-11,132
d		14,386	11,980	11,137	5,688	10,606	11,660	12,960	12,524	11,113	11,132
k_0		0,032	0,036	0,041	0,048	0,057	0,061	0,065	0,071	0,076	0,091

 $C_v = 1,0$

П-рп	C_s / C_v	-4	-3	-2	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
a		-12,102	-11,515	-11,113	-10,772	-10,893	-10,814	-11,183	-11,491	-10,572	-10,075
b		15,760	12,452	11,863	14,346	16,316	17,493	17,281	16,790	15,684	13,542
c		-16,729	-11,903	-8,007	-13,052	-15,402	-17,252	-17,498	-17,452	-16,537	-13,835
d		16,729	11,903	8,007	13,052	15,402	17,252	17,498	17,452	16,537	13,835
k_0		0,024	0,026	0,029	0,038	0,041	0,044	0,047	0,051	0,055	0,060

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

М. С. Торгомян

К классификации рек Армянской ССР

Армянская ССР расположена в центральной и восточной частях Малого Кавказа.

Реки территории республики питаются преимущественно талыми и дождевыми водами, стекающими с возвышенных частей нагорья. Существенную роль в питании рек играют также родниковые воды.

В связи с составлением Водно-Энергетическим Институтом АН Арм. ССР схемы использования средних и малых рек Армении для нужд электрификации сельского хозяйства, на основании тщательного изучения карт крупного масштаба, а также всего архивного материала УГМС Арм. ССР, из множества рек, ручьев и селевых потоков были выбраны 13 средних* и 221 малых рек, представляющих интерес для указанной схемы.

К средним рекам были отнесены те, которые имеют многочисленные притоки и охватывают территорию, которую можно рассматривать как самостоятельный бассейн.

К малым рекам были отнесены притоки средних рек, речки, впадающие в оз. Севан, а также некоторые малые притоки рек Куры и Аракса, имеющие энергетическое значение.

Вся речная сеть Армянской ССР разбита на следующие три основные группы:

1. Реки бассейна р. Куры;
2. Притоки р. Аракс;
3. Реки бассейна оз. Севан.

В первую группу входят 4 средних и 75 малых рек.

Во вторую группу—9 средних и 110 малых рек.

В третью группу входят 36 малых рек.

Ниже приводится список средних рек Армянской ССР.

I. Бассейн р. Куры: 1. Памбак, 2. Дзорагет, 3. Дебед, 4. Акстафа.

II. Бассейн р. Аракс: 5. Ахурян, 6. Касах, 7. Раздан (Занга), 8. Гарни, 9. Веди, 10. Арпа, 11. Мегри, 12. Охчи, 13. Воротан.

Главными признаками, по которым можно провести указанную группировку, являются длина реки и площадь водосборного бассей-

* Река Аракс не включена в число средних рек, так как она является большой рекой и, кроме того, только часть её течения находится в пределах Армянской ССР.

на. По каждому из этих признаков малые реки распределены между пятью группами, приведенными в таблице 1.*

Таблица 1

Группа	Длина реки в км			Группа	Площадь водосборного бассейна в км ²		
	Интервалы длин	Число рек	% от общего числа		Интервалы площадей	Число рек	% от общего числа
I	Менее 10	38	17,2	I	Менее 20	17	7,7
II	10—20	132	59,8	II	20—50	100	45,3
III	20—30	35	15,8	III	50—100	50	22,5
IV	30—40	12	5,4	IV	100—200	37	16,3
V	40—50	4	1,8	V	20—500	17	8,2

Из таблицы видно, что большая часть малых рек Армении имеет длину 10—20 км и площадь водосборного бассейна 20—50 км², но соответствующая им площадь водосбора составляет небольшую часть территории республики.

Из имеющейся в литературе классификации [3, 4] взяты следующие типы рек, отличающиеся друг от друга по характеру течения: 1. горные, 2. горно-равнинные, 3. равнинно-горные, 4. с чередующимися признаками.

Большинство малых рек Арм. ССР относится к типу горных, с большими падениями и скоростями течения, при средних уклонах от 0,006 до 0,15.

Некоторые реки имеют горно-равнинный характер (сначала горный, а затем равнинный**) как, например реки: Элар, Джаджур (басс. реки Ахурян), Таш-булаг (басс. реки Касак) или равнинно-горный характер (сначала равнинный, а затем горный), как, например, река Джилга (басс. реки Дзоратет) или с чередующимися признаками (то горные, то равнинные), как, например, река Адыман (басс. оз. Севан).

В табл. 2 приводится процентное распределение малых рек по вышеуказанным признакам:

Таблица 2

Горные	Горно-равнинные	Равнинно-горные	С чередующимися признаками
92	5	1	2

* Для тех рек, исток которых находится на территории Арм. ССР, а устье — на территории другой республики, в таблице указаны длины и площади водосборных бассейнов в пределах Арм. ССР.

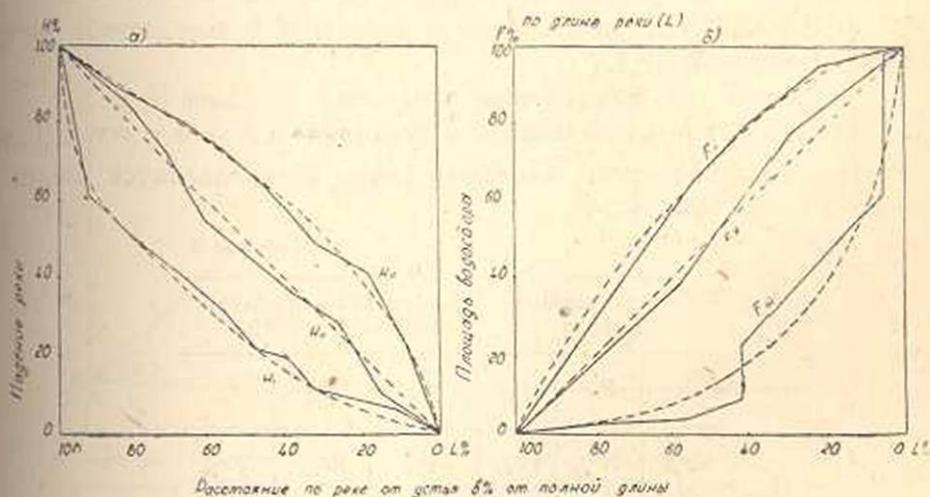
** К равнинным отнесены участки, на которых уклоны меньше 0,006.

Особый интерес представляет разделение рек по среднегодовому расходу и среднему падению. Это разделение отвечает целям энергетического использования рек (см. табл. 3).

Таблица 3

Группы	Среднегодовой расход в устье* (норма стока) м ³ /сек.			Группы	Среднее падение м/км		
	Интервалы расходов	Число рек	% от общего числа		Интервалы падения	Число рек	% от общего числа
I	Менее 0,1	14	6,3	I	Менее 10	3	1,3
II	0,1—0,5	109	49,4	II	10—20	12	5,4
III	0,5—1,0	51	23,1	III	20—50	51	23,1
IV	1,0—2,0	30	13,5	IV	50—100	114	51,7
V	2,0—5,0	17	7,7	V	100—150	41	18,5

Из таблицы видно, что большинство малых рек Армении имеет среднегодовой расход 0,1—0,5 м³/сек.* и среднее падение 50—100 м/км.



И. р. Налс-Телет (Басс. р. Астара)
 И. р. Дали
 И. р. Таш-Керпи } (Басс. р. Арпа)

Ф. р. Калер (Басс. р. Мегри)
 Ф. р. Таш-Керпи (Басс. р. Арпа)
 Ф. р. Карангу (Басс. р. Ахурян)

Рис. 1. а—Типы продольного профиля малых рек; б—типы кривых нарастания площади водосбора по длине реки

Для оценки реки, с точки зрения её энергетического значения, мало показать расход в устье и среднее падение. Большую роль иг-

* В таблице дана естественная водность реки без учета ирригационных отборов.

рает также вид продольного профиля и характер нарастания площади водосборного бассейна.

В целях устранения трудностей, связанных с различной величиной длин, падения и площади водосборного бассейна, при сравнении рек применен метод „относительного профиля“ [1]. При этом падение рек на данном участке выражается в процентах от полного падения реки, а длина—в процентах от полной длины. То же относится к нарастанию площади водосборного бассейна. Такой способ позволяет сравнивать по величине самые различные реки.

Существуют три основных типа продольных профилей и кривых нарастания площади водосборного бассейна:

А. Продольные профили (рис. 1 а).

а) Первый тип—„профиль равновесия“ (H_e) по терминологии С. В. Григорьева [1] характеризуется кривой гиперболического вида.

б) Второй тип—прямолинейный (H_n), т. е. очень близкий к прямой.

в) Третий тип—противоположный профилю равновесия—„Сбросовый“ (H_m). Характеризуется кривой параболического вида—малое падение в верховьях и большое—в низовьях.

Б. Кривые нарастания площади и водосбора (рис. 1 б)

а) Первый тип—повышенное в верховьях и замедленное нарастание в низовьях (F_e).

б) Второй тип—равномерное нарастание по длине (F_n).

в) Третий тип—замедленное в верховьях и резкое к устью (F_m).

Перечисленные типы по малым рекам распределяются следующим образом (табл. 4).

Таблица 4

Тип продольного профиля			Тип кривой нарастания площади водосбора		
H_e	H_n	H_m	F_e	F_n	F_m
62%	27%	11%	34%	46%	20%

На рис. 2 и 3 показаны продольные профили и кривые нарастания площадей водосбора некоторых малых рек Армении в относительных величинах. Из рисунков ясно, что энергетическую ценность имеют реки при сочетании кривых H_m и F_n , среднее место занимает сочетание H_n и F_n , и, наконец, самую низкую энергетическую ценность имеют реки с сочетанием кривых H_e и F_m . Таблица 5 дает представление о количестве малых рек (в процентах), для которых имеет место то или иное сочетание.

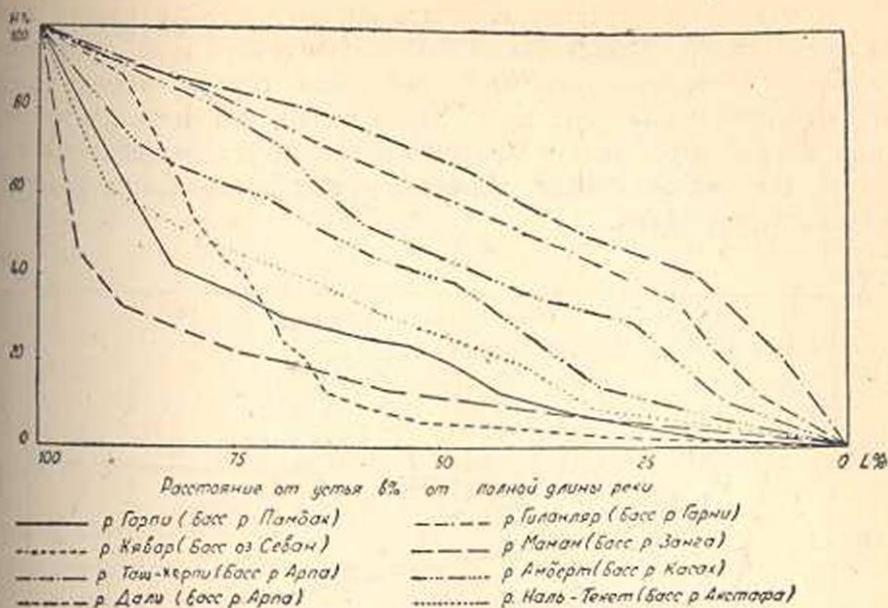


Рис. 2. Относительные продольные профили малых рек Армянской ССР.

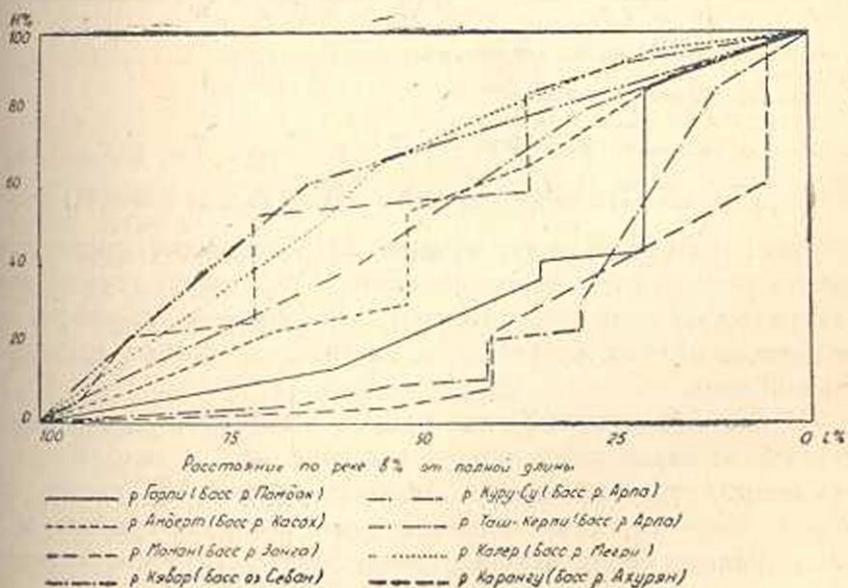


Рис. 3. Кривые зависимости относительного нарастания водосбора (F) от длины (L) для малых рек Армянской ССР.

Таблица 3

Сочетание	H, F_1	H, F_{II}	H, F_{III}	H, F_{IV}	H, F_V	H, F_{VI}	H, F_{VII}	H, F_{VIII}	H, E_{III}
%/о	26,8	26,0	9,0	7,6	14,6	5,0	6,0	2,7	2,3

Чтобы более наглядно показать преимущества, с точки зрения энергетического использования того или иного типа продольного профиля, построены кривые зависимости относительного падения (ΔH) от протяжения (рис. 4, L). Здесь видно, что реки, соответствующие кривой ΔH_{III} , имеют большую энергетическую ценность, потому что для них получается хорошее сочетание больших падений с большими расходами.

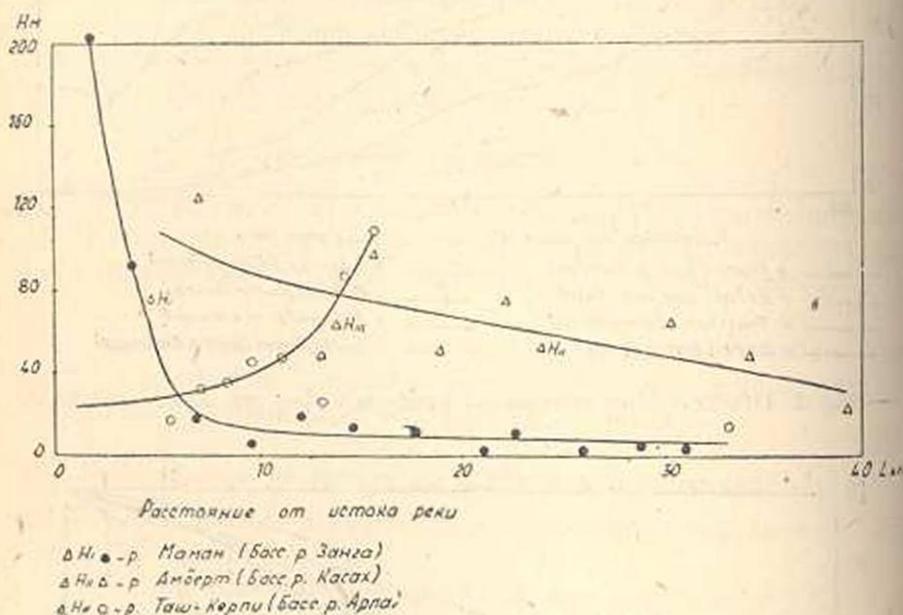


Рис. 4. Кривые зависимости удельного падения (ΔH) от длины (L) реки

Реки, соответствующие кривой ΔH_{III} — занимают среднее положение, а реки, соответствующие кривой ΔH_{I} , имеют самую низкую энергетическую ценность, потому что на них нет указанного выше сочетания, а именно: на участках, где падение велико, расходы малы и наоборот.

На рис. 5 показаны 3 типа кривых зависимости относительного изменения площади водосборного бассейна (ΔF) от протяжения (L). Здесь видно, что реки, соответствующие кривой ΔF_{I} , имеют самую большую энергетическую ценность; реки, соответствующие ΔF_{II} , занимают среднее место; наконец, реки, соответствующие кривой ΔF_{III} — имеют самую низкую энергетическую ценность.

Необходимо отметить, что переход от кривой, выражающей зависимость площади водосбора от длины реки к кривой зависимости расхода воды от того же фактора, производится умножением площадей на соответствующий им модуль стока. Для малых рек равнинных районов расчетный модуль стока является величиной постоянной или мало изменяющейся по длине реки. В этом случае кривая $Q=f(L)$ совпадает с кривой $F=f(L)$.

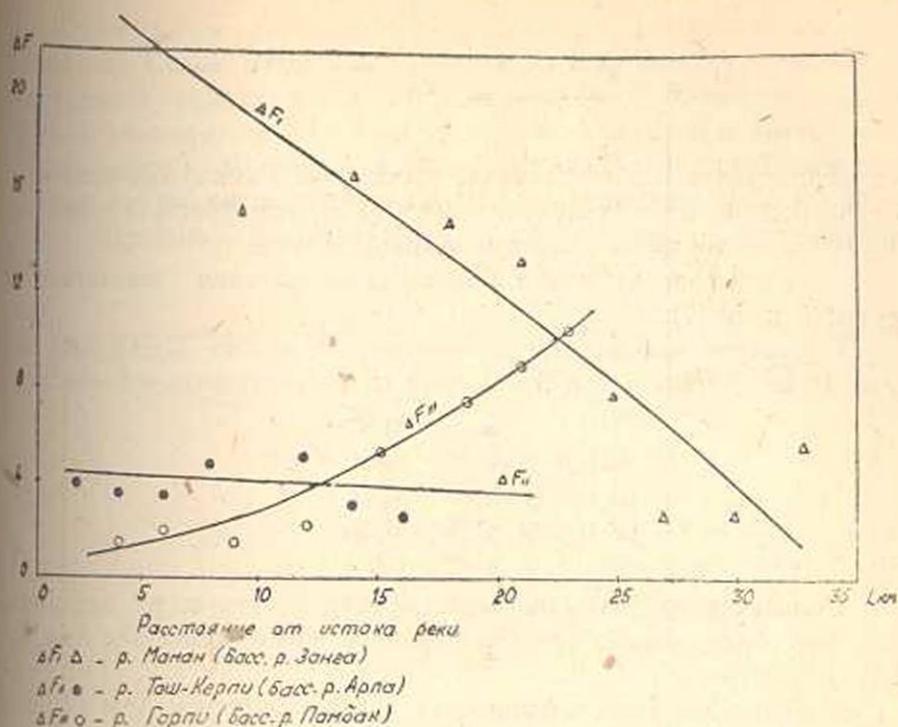


Рис. 5. Кривые зависимости удельного изменения площади водосборного бассейна (ΔF) от длины (L) реки

Для горных районов на большинстве малых рек обычно наблюдается постепенное уменьшение модуля стока по мере продвижения от истока к устью [2].

Характер и степень уменьшения (редукции) модуля стока будут влиять на результаты пересчета кривой $F = f_1(L)$ на кривую $Q = f_2(L)$, а, следовательно и на кривую зависимости мощности реки от её длины. Так, при водосборе типа F , и при понижении модуля по длине реки соответствующая кривая, выражающая изменение Q с L примет еще более резкое очертание, чем кривая F , что уважат на более высокую энергетическую ценность реки.

Противоположным будет влияние нарастания модуля стока, особенно при кривой водосбора типа F_{III} .

Сочетание профиля типа H , с кривой водосбора типа F_{III} при уменьшении модуля стока от истока к устью может привести к исключительно низким мощностям.

Необходимо, однако, отметить, что подобное сочетание для малых рек вообще встречается весьма редко. В первом приближении, принимая изменение модуля стока по длине постоянным, получим для малых рек коэффициент теоретической мощности, т. е. отношение суммы потенциальных мощностей реки по участкам к условной предельной мощности, как бы сосредоточенной в устье, по формуле:

$$\alpha = \frac{A \sum_1^i Q_i H_i}{A Q_y H}, \quad \text{где} \quad A \sum_1^i Q_i H_i -$$

— потенциальная мощность реки, вычисленная как сумма мощностей, получаемых на всех следующих друг за другом участках реки; $AQ_y H$ — потенциальная условная мощность реки.

Этот коэффициент может служить показателем энергетической ценности реки [1].

Группируя малые реки по величине α , можно предложить следующие категории рек в отношении их энергетической ценности:

I	$\alpha >$	0,60
II	$0,6 > \alpha >$	0,51
III	$0,5 > \alpha >$	0,41
IV	$0,4 > \alpha >$	0,21
V	$\alpha <$	0,20

Пользуясь предлагаемой классификацией рек по их энергетической категории, можно отнести большую часть малых рек Арм. ССР к IV категории.

Крайние значения коэффициента α для малых рек Арм. ССР равны 0,16 (река Кявар—басс. оз./Севан) и 0,63 (река Ташкерпи—басс. р. Арпа).

Для получения полного представления о водных ресурсах Армянской ССР в таблице 6 приводятся общие и энергетические признаки 13 средних рек. По характеру течения все эти реки—горного типа.

Таблица 6

Интервал длины км	Интервал площади водосбора км ²	Интервал средне-многолетних расходов м ³ /сек.	Интервал падения м/км
32÷205	339÷9670	3,00÷27,2	5,2÷68,5

Для рек, приобретающих данное название после слияния двух главных притоков, все характеристики, кроме расходов, даются для участка ниже указанных притоков, т. е. собственно, для данной реки.

Примерами подобных рек являются: 1) р. Дебед, начинающаяся после слияния рек Памбак и Дзорaget, водосборная площадь которых $F_0 = 0,75 F$, * 2) р. Касах—после слияния р. Таш-Булаг и Дузкенд, имеющие площадь водосбора $F_0 = 0,1 F$ и 3) р. Гарни—после слияния Гохт и Милидара с $F_0 = 0,43 F$ и др.

* F —Полная площадь водосборного бассейна реки, F_0 —площадь водосбора верхних притоков.

Что касается реки Раздан, то при её рассмотрении не учтен бассейн оз. Севан. Это происходит, во-первых потому, что расход, поступающий раньше из озера в Раздан, не соответствовал водосборной площади озера, а являлся только функцией водного баланса последнего и, во-вторых, потому, что уже с 1933 года естественное питание Раздан нарушено большими попусками воды на ирригацию и энергетику, в соответствии с требованиями Севанской проблемы.

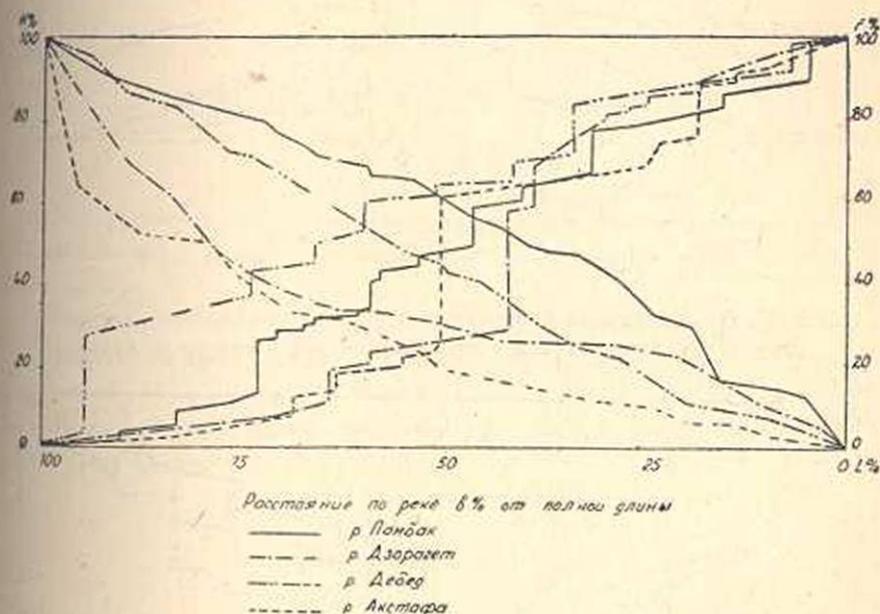


Рис. 6. Относительные продольные профили и кривые относительного изменения площади водосбора средних рек бассейна р. Куры

На рис. 6 изображены кривые относительно профиля и кривые нарастания водосборных площадей для средних рек бассейна р. Куры. На рисунках 7 и 7а — то же для средних рек бассейна Аракс.

В число рассмотренных средних рек не вошла р. Сев-Джур, которая, несмотря на свою многоводность, не представляет энергетического интереса, ввиду незначительности падения.

В число малых рек не вошли те реки, которые имеют селевой характер стока и потому совсем не пригодны для энергетического использования, а именно: 1. Гедар — басс. р. Раздан, 2. Мастара — басс. р. Аракс, 3. Куру-Селав — басс. р. Гарни.

Самая значительная из этих рек — Гедар, нижнее течение которой находится в пределах города Ереван. Временами Гедар не имеет естественного стока и вода в него поступает при искусственных сбросах из Крх-Булагских родников. При выпадении значительных осадков в бассейне реки возникают мощные селевые паводки. Так, 25 мая 1946 года наблюдался сель с максимальным расходом около $200 \text{ м}^3/\text{сек}$, причинивший большие бедствия гор. Еревану.

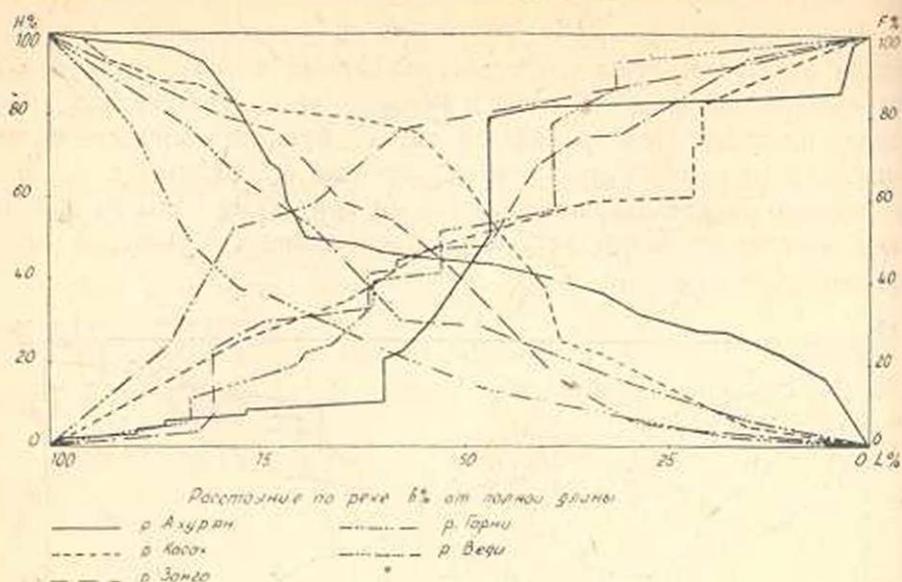


Рис. 7. Относительные продольные профили и кривые относительного изменения площади водосбора средних рек бассейна р. Аракс.

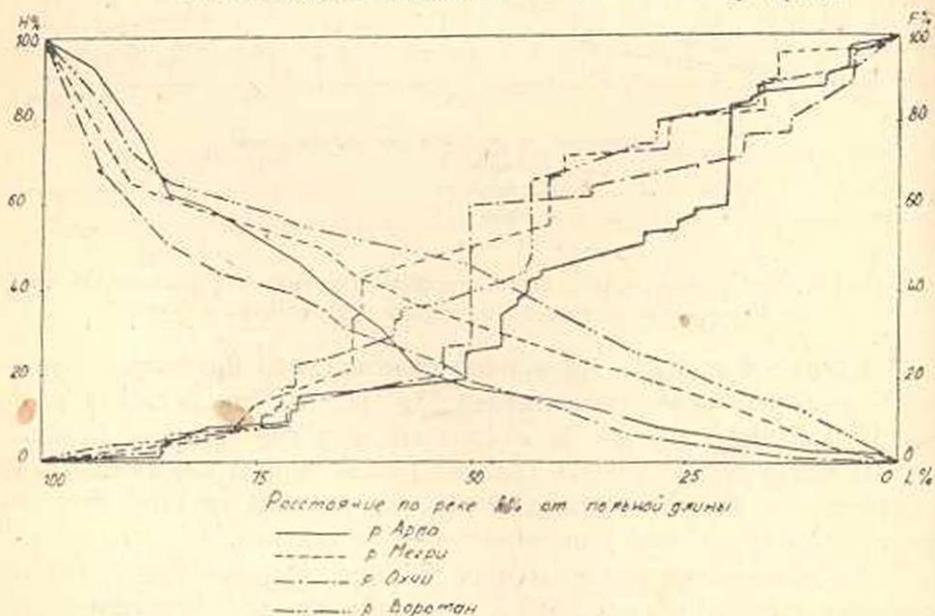


Рис. 7а. Относительные продольные профили и кривые относительного изменения площади водосбора средних рек бассейна р. Аракс.

В заключение необходимо отметить, что в результате применения к рекам Армении метода типизации [1] и классификации [4] рек, удалось дать энергетическую оценку отдельным водотокам, что может служить в дальнейшем для целей выявления энергетических ресурсов республики на базе малых и средних рек.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Григорьев С. В.—Потенциальные энергоресурсы малых рек СССР, Тр. Гос. Гидролог. Ин-та, вып. 34. Гидрометиздат. 1946.
2. Зайков Б. Д.—Средний сток и его распределение в году на территории Кавказа, Тр. Гос. гидролог. Ин-та, вып. 40. Гидрометиздат. 1946.
3. Лысович М. И.—Опыт классификации рек СССР. Тр. Гос. Гидролог. Ин-та, вып. 6. Гидрометиздат. 1938.
4. Родевич В. М.—К вопросу классификации рек. Изв. Гос. Гидролог. Ин-та, № 35, 1931.

Մ. Ս. Քորզումյան

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌԻ ԿԵՏԵՐԻ ԴԱՍԱԿԱՐԳՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Փողոզրդական անտեսության դարգացման համար հոկայական նշանակություն ունի ջրային պետությունների հայտնաբերումը և նրանց ճիշտ գնահատումը:

Հոգովածում հեղինակը կատարել է Հայկական ՍՍՌ գետերի հիդրոգրաֆիական հատկանիշների դասակարգումը՝ կապված նրանց հիդրոէներգետիկական հնարավորությունների հետ: Տրվում է տարրեր լամբերի պատկանող գետերի կշիռն ընդհանուրի մեջ և նրանց գնահատականը՝ պրակտիկալ էներգիայի տեսակներից:

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Г. А. Атанасян и Х. Р. Палян

Динамическое моделирование гидроэнергосистем

Под редакцией действ. чл. АН Арм. ССР И. В. Егназарова

1. В в е д е н и е

В настоящей статье подведены итоги работы отдела моделирования Гидроэнергосистем, созданного Водно-Энергетическим Институтом АН Арм. ССР по инициативе действ. чл. АН Арм. ССР И. В. Егназарова с 1946 года.

Первоначально непосредственной задачей этого отдела являлось освоение теории физического моделирования электросистем, созданной в ССР преимущественно работами доцента В. А. Веникова, и дальнейшее совершенствование и углубление этой теории. В этом направлении произведена подготовка к решению задачи, имеющей специфический интерес для гидроэнергетики Армении.

После окончания этой первой стадии работы, в процессе выполнения которой в Гидро-электрической лаборатории ВЭИ создавалась группа специалистов, к работам которой привлечен В. А. Веников, был поставлен вопрос о сооружении динамической модели гидроэнергосистемы.

Сооружение такой модели является делом весьма нелегким: достаточно указать, что в такой мощной организации как МЭИ динамическая модель проектировалась и сооружалась в течение более пяти лет и до сих пор не закончена полностью. Медленными темпами идет сооружение динамических моделей в ЦНИЭЛ-е МЭС, Энергетическом Институте АН Узбек. ССР и некоторых других организациях.

Водно-Энергетический Институт пошел по несколько отличному пути. Положив в основу теоретические разработки доц. В. А. Веникова, Институт отказался от осуществления спроектированного Вениковым универсального генератора-модели, сооружение которого, однако, связано со значительными производственными трудностями.

В основу модели ГЭЛ было положено предложение, разработанное членом-корр. АН СССР М. П. Костенко.

Это предложение также подверглось существенной переработке и упрощениям, позволившим в короткий срок провести рабочее проектирование модельного комплекта силами сотрудников Ереванского Электро-машиностроительного завода и провести на этом же заводе

изготовление названных машин. Одновременно с этим был закончен и проект остальных частей первой очереди динамической модели ВЭИ, которая теперь уже близка к завершению.

2. Постановка задачи. Появление необходимости в динамических моделях

Новые задачи, которые придется разрешать советским энергетикам при осуществлении Сталинских пятилеток, требуют новых средств анализа, новых методов исследования. Все более острой становится необходимость быстрого и возможно более точного решения усложняющихся и исключительно трудоемких расчетных задач, носящих одновременно и проектный и научно-исследовательский характер.

Аналитические способы решения этих задач, применявшиеся до настоящего времени, несмотря на их развитие, не могут удовлетворить инженера, проектирующего и эксплуатирующего новые грандиозные энергосистемы СССР.

Аналитические методы исследования приводят к громоздкости вычислений, требующих огромной затраты времени и труда.

Для того, чтобы сделать аналитическое решение возможным, а также для сокращения времени и облегчения расчетов, приходится вводить целый ряд упрощающих предположений, часто весьма произвольных и физически недостаточно обоснованных.

Разумеется, что это обстоятельство приводит к снижению надежности получающихся результатов. Если применительно к существующим системам неизбежные при таком положении неточности как-то корректировались опытом^{*}, то применительно к решению новых задач, таких задач, которые должны решаться до того, как будет накоплен соответствующий практический опыт, аналитический подход без надлежащей опытной проверки становится совершенно неудовлетворительным.

Весьма специфическим моментом в рассматриваемой нами проблеме является то обстоятельство, что гидроэлектрическая система от подводящих воду трубопроводов до шин, где подключена нагрузка, является в сущности единым, неразрывным целым. Отдельные части этой системы: электрическая, механическая, гидравлическая—тесно связаны друг с другом и оказывают влияние друг на друга. Между тем расчеты и аналитические исследования принято производить отдельно, независимо для каждой из этих частей. Этот разрыв неизбежно снижает общую ценность решения задач, возникающих при проектировании и при эксплуатации объединенных гидроэлектрических систем. Попытки расширить аналитическое решение встречают трудности двух видов: недостаточные возможности опытной проверки допущений, делаемых при составлении уравнений

* Легко показать, что и на ряд вопросов, возникающих при сооружении и эксплуатации даже не очень больших систем существующие аналитические методы не дают исчерпывающего ответа.

и сложность решения уравнений, составленных с теми или иными обоснованными или необоснованными допущениями. Преодоление трудностей решения уравнений направляет инженерную мысль на пути изыскания механизации и автоматизации вычислительных операций и облегчения этим аналитических расчетов. Здесь можно упомянуть о ряде счетно-решающих машин от арифмометра до механического интегратора, построенного в ЭНИН-е АН СССР И. С. Бруком, и о различных конструкциях расчетных столов постоянного и переменного тока. К расчетным моделям надо отнести электроинтеграторы Л. П. Гутенмахера с электрическими схемами для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, а также различные электромодели и механические модели, основанные на принципе аналогий. Установки этого рода непрерывно совершенствуются; они весьма остроумны и, значительно облегчая труд, экономят время при решении сложных дифференциальных уравнений. Однако они не могут способствовать проверке исходных положений и допущений, положенных в основу при составлении тех или иных уравнений и не могут дать удовлетворительный ответ на вопросы, относящиеся к взаимосвязи отдельных частей мощной энергосистемы с динамическими элементами-агрегатами электрических станций.

3. Моделирование электросистем, как метод, тесно связывающий аналитические и экспериментальные пути исследования

Решение вопросов описанного характера, весьма существенных для энергетики, очевидно, должно идти по пути моделирования, по пути более тесной связи теории и эксперимента.

Советские ученые и инженеры много работали в этом направлении, разрабатывая методы экспериментальных исследований решения разнообразных и сложных задач, возникающих в практике проектирования и эксплуатации электротехнических устройств.

Комплексные динамические модели электрических систем должны дать наиболее эффективное решение и открыть широкие возможности учета взаимосвязи процессов, происходящих во всех частях мощных гидроэлектрических систем. Такие комплексные динамические модели, строящиеся с возможно строгим соблюдением основных законов физической теории подобия в соответственно уменьшенном масштабе, копируют мощные системы. Применение законов теории подобия и методов моделирования позволяет с достаточной точностью отражать процессы, имеющие место в действительных мощных системах. В то же самое время модели систем обеспечивают возможность повторения исследуемых процессов и детального изучения их в условиях, всецело зависящих от воли экспериментатора. Возможности экспериментального исследования различных теоретических и практических вопросов расширяются применением, наряду со строгими

методами теории подобия, методов комбинированного или же приближенного моделирования.

Начало разработки таких методов, в части моделирования электросистем, положено работами В. А. Веникова и, несомненно, что тот путь, по которому идут работы Лаборатории моделирования ГЭЛ ВЭИ, должен привести к дальнейшему совершенствованию динамических моделей и облегчению их сооружения. Кроме этого, следует особо подчеркнуть значение, которое динамические модели гидро-электрических систем могут иметь для подготовки кадров инженеров и научных работников; следует подчеркнуть их педагогическое значение. Модели открывают неограниченные возможности демонстрации и изучения различных режимов, наблюдающихся при эксплуатации систем, но сравнительно редко имеющих место в действительных условиях. Таким образом, может быть создан такой опыт работы в системе за несколько лет, который нельзя получить, работая только в действительной энергосистеме за десятки лет.

Производить научные исследования в таких случаях в действительных системах по вполне понятным причинам, в большинстве случаев, невозможно. Если иногда такие возможности и представляются, то неизбежные ограничения в условиях эксперимента в той или иной степени снижают ценность получаемых результатов.

При моделировании электрических систем имеют место трудности другого характера. Прежде всего здесь существенным оказывается то обстоятельство, что характер процессов, происходящих в электрических машинах, в сильной степени зависит от геометрических размеров машин. Эта зависимость ставит перед экспериментатором ряд требований, удовлетворение которых может быть затруднительно. Дальнейшими ограничениями являются:

1. требование одинаковости характеристик холостого хода у модели и у оригинала и
2. одинаковости характеристик механических моментов первичных двигателей,
3. требование малых активных потерь в железе машин моделей (1,5%), потерь на трение о воздух (0,25%) и потерь на трение в подшипниках.

Разумеется, что в каждом отдельном случае вопрос об ограничениях эксперимента должен быть проверен особо.

4. Краткий исторический обзор применения моделирования в электротехнике

Построение моделей для изучения на них процессов, происходящих в действительных устройствах, уже давно завоевало прочное место в различных областях техники: в аэродинамике, гидротехнике и теплотехнике.

Построение модели основывается на физической теории подобия, разрабатывавшейся физиками и инженерами еще со времен Нью-

тона, но получившей наиболее полное развитие в Советском Союзе, в трудах советских ученых [1, 5].

Здесь следует упомянуть работы акад. М. В. Кирпичева, особенно развившего теорию подобия в применении к теплотехнике [1].

Большое применение находит теория подобия в гидродинамике и ее технических приложениях [4]. Здесь можно было бы сослаться на ряд работ, проводимых в ГЭЛ ВЭИ действ. членом АН Арм. ССР И. В. Егиазаровым и под его руководством [9].

Моделирование основных элементов электрических систем—синхронных генераторов—вначале пытались свести к простой подгонке параметров модели, выраженных в относительных единицах, к параметрам природы, не пытаясь применять теорию подобия.

Таковы были первые попытки создания модели в ВЭИ (Р. А. Майер, 1935 г.), в Энергетическом Институте АН СССР (Веников, 1935 г.) [6], в Ленинградском Политехническом Институте им. Калинина (В. И. Иванов, 1939 г. и В. А. Толвинский, 1939—41 г.г.) [10].

Модель энергосистемы, построенная Вениковым в ЭНИИ-е, была в дальнейшем усовершенствована, причем особое внимание было уделено созданию устройств, обеспечивающих изменимость параметров в соответствии с требованиями теории подобия. На этой же модели автор ее специально исследовал возможности созданной им теории приближенного моделирования [10]. В дальнейшем Вениковым был выполнен ряд оригинальных работ, создавших теорию моделирования электрических систем, полностью согласованную с основными положениями физической теории подобия. В дальнейшем эти теоретические исследования находят свое отражение в строящейся динамической модели МЭИ (1943—1949 г.г.).

Над вопросами создания динамической модели энергосистемы плодотворно работал член-корреспондент АН СССР и крупнейший специалист по теории электромашиностроения М. П. Костенко, построивший в 1942 г. динамическую модель. Эта модель позволила упростить и ускорить проверку устойчивости параллельной работы гидроэлектростанций одной советской системы и тем содействовать скорейшему расширению этой системы и вводу в эксплуатацию новых мощностей и нагрузок [8]. В дальнейшем к сооружению динамических моделей приступили Энергетический Институт АН Узб. ССР и Центральная Лаборатория Министерства Электростанций СССР (дока еще только проекты).

В 1945 г. в эту работу включился Водно-Энергетический Институт ВЭИ АН Арм. ССР, поставив своей задачей охват гидроэнергосистемы в целом, в ее гидравлической, механической и электротехнической части.

К концу 1948 года была закончена работа по освоению теории моделирования энергосистем, намечены теоретические основы будущей модели ВЭИ и, наконец, был составлен эскизный проект этой модели с основной ориентацией на задачи, непосредственно стоящие

перед гидроэнергетикой Армении.* В дальнейшем были определены задачи, которые должны будут решаться с помощью этой модели и была установлена очередность решения этих задач в зависимости от потребностей практики эксплуатации и дальнейшего развития энергетики Арм. ССР.

5. Краткий обзор теорий моделирования гидроэнергосистемы в ее электрической части

Моделирование электрических систем требует знакомства с общей теорией физического подобия и знания физики моделируемых явлений.

Напомним вкратце основные теоремы теории подобия, сформулированные применительно к задачам моделирования электрических систем Вениковым.

Первая теорема гласит, что для создания физического подобия процессов необходимо и достаточно вызвать подобные явления, производя подобные действия в подобных электрических схемах.

Основы теории подобия в электротехнике остаются теми же, что и в других областях науки и техники. Так, в основных положениях теории подобия, изложенных Егизаровым [9], указывается, что постоянные множители, характеризующие переход от одного явления (модели) к другому (натура), нужно выбирать так, чтобы в обоих случаях дифференциальное уравнение удовлетворялось. Подобные схемы имеют то свойство, что дифференциальные уравнения их приводятся к одинаковому виду после преобразования их констант и изменения масштабов их переменных.

Согласно второй теореме для возможности моделирования электромеханических процессов в электрических системах необходимо иметь одинаковые собственные взаимные постоянные времени во всех контурах. Математически это выражается так:

$$T_k = \frac{\omega L_k}{r_k} = \text{idem} \quad \frac{i_a}{i_k} T_{ak} = \text{idem},$$

$$\text{где } T_{ak} = \frac{L_{ak}}{r_k t}, \text{ или в случае}$$

емкостной связи

$$T_{ak} = \frac{C_{ak} r_k}{t} = \frac{C_{ak}}{g_k t}$$

и одинаковые постоянные инерции

$$M = \frac{2749 G D^2 n^2}{1000 W}$$

* К работам по решению этих задач в ВЭИИ были привлечены доц. к. т. н. В. А. Веников, активно помогавший коллективу отдела моделирования ГЭЛ, и чл.-корр. М. П. Костенко, любезно предоставивший в распоряжение ГЭЛ выполненные им проекты машин-моделей.

Кроме того, необходимо соблюдать равенство потерь на трение в подшипниках и потерь в железе у оригинала и у модели.

Предварительным и необходимым условием правильности моделирования является одинаковость характеристик холостого хода у оригинала и у модели.

Для того, чтобы две системы были подобны, необходимо, чтобы были неизменны в течение всего исследуемого процесса критерии подобия этих систем. Критериями же подобия принято называть определенные комбинации, комплексы, нескольких величин, характеризующих явление, подлежащее моделированию.

Различаются два вида критериев подобия: определяющие, инвариантность которых является условием получения подобия, и определяемые, инвариантность которых вытекает из наличия определяющих критериев. В работах по теории подобия [4,9,10] приводятся следующие методы нахождения критериев подобия:

1. метод анализа размерностей,
2. метод анализа дифференциального уравнения процесса, записанного в относительной системе координат.

Метод анализа размерностей рекомендуется применять в случаях, когда дифференциальное уравнение моделируемого явления неизвестно. Здесь необходимо глубокое проникновение в физику моделируемого процесса, и возможно, производство дополнительных исследований, уточняющих результаты [2].

В случаях же, когда дифференциальное уравнение системы известно, оно приводится к безразмерному виду, после чего определением аналогов получают искомые критерии подобия.

В дальнейшем приводим краткую сводку основных критериев подобия, магнитно связанных, вращающихся друг относительно друга электрических контуров.

1. Критерии электромагнитных скоростей записываются так:

$$\frac{L'_k}{r_k t} = T_k = \text{inv}, \quad \frac{i_a L_{ak}}{i_k r_k t} = \frac{i_a}{i_k} T'_{ak} = \text{inv}$$

Эти критерии являются критериями подобия скорости изменения электромагнитного состояния любых сложных электрических цепей.

2. Дальнейшим критерием, важным для электромеханических процессов, является критерий подобия механической скорости.

$$M' = \text{inv} \frac{J_0}{M_{\text{мех}} t^2} = \text{inv},$$

где M' — постоянная инерции в относительных единицах

J_0 — момент инерции машины

$M_{\text{мех}}$ — механический вращающий момент на валу генератора.

3. Определяющим критерием, устанавливающим соответствие во времени у модели и натуры мгновенных значений переменных величин (u ; i ; δ и т. д.), является критерий гомохронности.

В относительной системе единиц критерий гомохронности следует непосредственно из определения единицы времени

$$t' = 1$$

В именованной системе единиц он дан выражением:

$$\omega t = inv$$

Мы не будем останавливаться здесь на ряде дополнительных (определяемых) критериев подобия, важных для установления масштабов переменных, но легко получаемых в конкретных задачах.

Для нахождения критериев подобия можно исходить из дифференциальных уравнений синхронной машины Горева-Парка [10].

Эти уравнения с достаточной степенью точности описывают процессы, происходящие в синхронных машинах любой мощности, частоты и конструкции.

Метод моделирования заключается в следующем:

уравнения модели и оригинала записываются так, что номинальные мощности и токи машин принимаются за базисные. При этом предполагается, что частоты обеих систем равны [7].

Выражая параметры модели (М) через параметры оригинала (О), имеем:

$$r_m = p_r r_o ; X_m = p_x X_o ; M_m = \frac{1}{p_m} M_o \quad T_m = \frac{1}{p_t} T_o$$

Подставляя выражения, выведенные для параметров модели, в дифференциальные уравнения оригинала, получим систему основных дифференциальных уравнений модели, отличающуюся от дифференциальных уравнений оригинала постоянными коэффициентами p_x ; p_r ; p_m ; p_t .

Формальным и материальным изменением параметров модели добиваются исчезновения этих коэффициентов из уравнения моделирования. Отсюда можно прийти к двум методам моделирования: 1) моделирование при изменении частоты модели и 2) моделирование при равенстве частот оригинала и модели. При этом параметры изменяются включением специальных дополнительных устройств и конструктивными преобразованиями электрических машин.

Стремление максимально облегчить организацию и постановку экспериментов на динамической модели электросистемы, удовлетворив в то же время требованиям теории подобия, побудило разработать методы так называемого приближенного моделирования.

Критерий подобия электромеханических явлений упрощается и может быть кратко записан так:

$$\frac{M}{T_o^2} = idem.$$

Кроме того, необходимо добиться инвариантности $\frac{x}{r}$ целей ста-

тора или соответственной инвариантности собственных и взаимных импеданцев:

$$\left(\frac{X_k}{\Gamma_k} \right)_{ст} = inv \quad Z_{вз} = inv.$$

Результаты опытов на модели заключают в себе те или иные неточности, которые необходимо определять особо в каждом отдельном случае. Этот недостаток модельных экспериментов не существенен, так как в большинстве практически важных случаев погрешности не превышают точности соответствующей точности исходных данных и вполне искупаются целым рядом практических преимуществ. К этим преимуществам относятся: возможность применять в качестве моделей малогабаритные электрические машины серийного производства, возможность широкого и свободного изменения масштаба времени независимо от частоты и т. д.

Возможность применения серийных машин основана на том, что при моделировании электрических систем мы, не желая вдаваться в анализ сложных процессов внутри машин, стремимся моделировать только явления, происходящие вне машины, в сети, но с правильным учетом влияния машины.

Ни геометрическое подобие, ни подобие полей машин оригинала и модели при этом не соблюдаются.

6. Динамическая модель гидроэлектросистемы

Динамическую модель гидроэлектросистемы предполагается смонтировать и пустить в работу двумя очередями:

I-я очередь наряду с возможностями теоретических исследований позволит моделировать две существующие крупные гидроэлектростанции энергосистемы Армении.

а) станция № 1—моделируется синхронным генератором-моделью, условно названным СГ—6,25/6—1000;

б) станция № 2—моделируется синхронным генератором-моделью, носящим название СГ—25/6—1000.

II очередь динамической модели позволит моделировать две новые гидроэлектростанции куста;

в) станция № 3—моделируется синхронным генератором типа СГ—6,25/6—1000;

г) станция № 4—моделируется синхронным генератором СГ—25/6—1000.

Весь комплект электродинамической модели будет состоять из блоков электрических машин, которые монтируются на специальных стендах.

В состав модели входят:

- стенд основных агрегатов,
- стенд компенсаторов,
- стенд возбуждательных агрегатов.

а) Стенд основных агрегатов. На стендах основных агрегатов устанавливаются две группы машин: первая группа машин состоит из синхронного генератора типа СГ-6, 25/6-1000 со своим электродвигателем ПН-100 (машины постоянного тока). На одном валу с этими машинами находится специальная машина для измерения угла между ЭДС этих машин и напряжением (δ).

Вторая группа машин состоит из синхронного генератора типа СГ-25/6-1000 и электродвигателя типа ПН-290. Генератор первой группы машины мощностью в 6,25 ква переделывается из нормальной машины типа СГ-35/6-1000.

Генератор второй группы машин аналогичным образом переделывается из стандартной машины типа С-125/6-1000. В основном переделка вызвана необходимостью уменьшения активного сопротивления статорных обмоток генераторов и подгонки остальных параметров (реактансов) машины под параметры оригинала, т. е. действительных машин, подлежащих моделированию.

Специальные машины для измерения угла „ δ “ конструируются из низковольтных машин постоянного тока.

б) *Характеристика машин, применяемых для моделирования.* Перечисленные выше машины, применяемые для моделирования, сооружаются, как уже указывалось выше, на базе серийных машин типа СГ. Однако машины модели ВЭИ существенно отличаются от типовых машин.

Модель генератора первой очереди сооружается на базе нормального синхронного генератора типа СГ-35/6, выпускаемого Ереванским Электромашиностроительным заводом. Согласно технических условий, разработанных ВЭИ, генератор должен иметь нижеследующие технические данные:

В цепь возбуждения последовательно включается серийный генератор, создающий отрицательное сопротивление, уменьшающее суммарное сопротивление цепи в 6 раз. Характеристика холостого хода должна быть стандартной. Постоянная инерция генератора должна быть увеличена при помощи специальных дисков, укрепляемых на валу генератора:

$$M_{\text{диск}} = M_1 - M_2 + M_{\text{зап.}}$$

где $M_{\text{диск}}$ — постоянная инерция дисков,

M_1 — постоянная инерция натуре 6-6,5 сек,

M_2 — постоянная инерция генератора и двигателя после переделки,

$M_{\text{зап}}$ — 12 сек.

Количество маховых дисков должно быть таким, чтобы момент инерции можно было изменять через 1,5 секунды, причем надо изготовить один диск для подгонки момента инерции агрегата до целого числа. При разработке проекта и составлении рабочих чертежей

№ п/п	Наименование	Данные	Примечание
1	Мощность после переделки	6,25 квт	
2	Напряжение	230 вольт	
3	Число оборотов	1000 об/мин.	
4	Число фаз	3	
5	Частота	50 пер сек.	
6	Коэффициент мощности	0,8	
7	Активное сопротивление статорной обмотки	минимально возможное при данных габаритах.	
8	Реактивное сопротивление статорной обмотки		
9		$X_d = 112 - 115\%$	Необходимо регулирование X_d в пределах $\pm 20\%$
10		$X_c = 8 - 10\%$	
11		$X_q = 70 - 75\%$	
12		$X_s = 18 - 22\%$	
13		$X'd = 30 - 35\%$ $X''d = 20 - 25\%$	

Данные по ротору должны быть следующими:

Ротор генератора	Величина
Номинальный ток возбуждения (длительный)	5,2 А.
Кратковременный ток	15,6 А.
Активное сопротивление	Минимально возможное

генератора на Ереванском Машиностроительном Заводе, удалось сохранить полностью все основные детали (место плюсов ротора и статора, лист полюса возбуждителя и др.), а также целиком применить такие детали, как щиты, вентиляторы, коллектор, траверзы со щеточной арматурой, контактные кольца, подшипниковые узлы и др. Станина генератора и сердечник статора оказались отличными от нормального исполнения лишь только длиной пакета статора. Вал генератора удлинен в связи с тем, что на его рабочий конец должен насаживаться маховик-муфта специальной конструкции, обеспечивающая регулировку постоянной инерции агрегата, не разбирая последнего. Все обмотки генератора (обмотки статора, полюсов ротора, якоря и шунта возбуждителя) выполняются заново.

Статорная обмотка генератора помимо основной её части, имеет также регулировочные добавочные витки, при помощи которых можно регулировать X_d в пределах $\pm 20\%$ от номинального значения.

Схема соединений обмотки приведена на рис. 1.

Как показал электрический расчет синхронного генератора, предъявленные технические условия почти полностью соблюдены, за исключением некоторых значений реактивных сопротивлений (X_s , X'_d и X''_d), которые получились отличными от требуемых данных, приведенных в технических условиях.

в) *Стенд компенсаторов.* Для компенсации активных сопротив-

лений статорных и роторных цепей синхронных генераторов, устанавливаются трехфазные и однофазные коллекторные машины с последовательным возбуждением следующих типов: КГО—85; КГТ—85; КГО—45 и КГТ—45. Указанные машины, так же как и генераторы, являются не стандартными, но выполняются на основе серийных машин постоянного тока (на базе машин ПН—45 и ПН—85). Каждая машина-компенсатор приводится во вращение самостоятельным двигателем, сидящим на одном валу с компенсатором.

г) *Характеристика машин-компенсаторов.*—Как указывалось выше, для компенсации активного сопротивления обмотки возбуждения синхронного генератора типа СГ—6, 25/6 сооружается однофазный коллекторный генератор типа КГО—45, на базе машины постоянного тока типа ПН—45 и по расчетным данным члена-корреспондента АН СССР проф. Костенко М. П. со следующими изменениями:

1. В расчетных данных Костенко наружный диаметр железа статора указан $d=295$ мм. Так как компенсатор должен был изготовляться путем переделок соответствующих деталей и узлов существующей 4-х полюсной машины ПН—45, то для сохранения станины (имеющей фактические размеры внутреннего диаметра $d=288$ мм, а наружного $d=316$ мм), пришлось наружный диаметр железа статора уменьшить до $d=290$ мм, в целях сохранения резьбовых отверстий (в теле стенки для крепления подшипниковых щитов) и толщины самой стенки станины. В связи с этим, для сохранения расчетного значения индукции в стенке статора пришлось уменьшить глубину паза с 36 мм до 34 мм. Уменьшение площади паза вполне возможно, так как 52 проводника всех обмоток из меди ПБД $d=1,81/2,08$ вмещаются в пазу с уменьшенной высотой на 2 мм сравнительно легко. Тем более, что по 52 проводника укладываются всего лишь в восьми пазах, в остальных же пазах будут укладываться либо по 46 проводников, либо по 22 проводника.

2. Для сохранения остова якоря (вместе с пакетом железа, коллектором, валом и подшипниковыми узлами) длину пакета железа якоря пришлось изменить с 100 мм до 110 мм (так как фактическая длина пакета якоря равна 110 мм, а число и размеры пазов якоря согласно расчетным данным Костенко сохраняются такими же, как у ПН—45).

3. Вследствие того, что вылет лобовых частей обмоток не позволял сократить длину станины, глубину подшипниковых щитков, а также расстояние между подшипниками и месторасположения щеточной траверзы, пришлось длину станины нарастить на 30 мм путем постановки двух промежуточных колец (шириною по 15 мм), позволивших, кстати сказать, сохранить диаметры замков у обоих подшипниковых щитов. Таким образом, благодаря введению вышеназванных изменений некоторых величин, заданных расчетом, к приме-

нению несложных новых деталей, удалось сохранить, без больших переделок, все основные детали машины ПН—45.

Применение уже простых промежуточных колец оказалось возможным лишь благодаря удачно примененной и разработанной конструктивной форме катушек обмоток статора. Принципиально развернутая схема всех обмоток статора сохранена полностью, согласно расчетным данным. На рис. 2 приведена схема обмоток компенсатора. Концы всех обмоток статора выводятся в специальную клеммовую коробку, размещенную сбоку станины. Катушка основной и вспомогательной обмотки возбуждения конструктивно выполнена в виде одной 24-витковой катушки с тремя совершенно отдельными парами отводов соответственно от 18-витковой, 3-х витковой первой и 3-х витковой второй частичных катушек, так как витки основной и вспомогательной обмоток должны занимать одни и те же пазы.

Вывод на клеммовую доску начал и концов обеих вспомогательных обмоток (третьей и четвертой) позволяет осуществить регулировку числа витков основной обмотки возбуждения в широких пределах в сторону уменьшения и увеличения без разборки машины.

д) *Стенд возбудительных агрегатов.* Для возбуждения основных генераторов предусматривается установка специальных возбудительных агрегатов. Каждый генератор имеет свой возбудительный агрегат; состоящий из главного возбудителя и подвозбудителя. В качестве главного возбудителя принята машина типа ПН—17,5, в качестве подвозбудителя—машина типа ПН—5. Обе указанные машины сидят на одном валу и приводятся во вращение синхронным двигателем марки АД—31/4.

е) *Схема коммутации модельных установок.* Основные агрегаты электродинамической модели (главные генераторы) собраны по балочной схеме.

Каждый генератор имеет свой трансформатор. Фазы генератора соединены в звезду. Соединение фаз трансформатора со стороны генераторного напряжения (230 вольт) в треугольник, со стороны высокого напряжения (460 вольт) в звезду.

С каждой из фаз синхронного генератора последовательно включается фаза 3-х фазного коллекторного генератора. Включение производится со стороны нулевой точки генератора. С роторной обмоткой синхронного генератора последовательно включается обмотка возбуждения однофазного коллекторного генератора. Включение агрегата (генератор-трансформатор) к шинам 460 вольт сетевого устройства произведено с помощью автоматических выключателей, имитирующих масляные выключатели реальной энергосистемы.

Отключение выключателей в аварийных режимах предусматривается от специально запроектированных релейных устройств. Ком-

плект релейных устройств запроектировано установить на каждом из агрегатов со стороны трансформаторов.

На каждом из генераторов устанавливаются также по два комплекта измерительных трансформаторов тока типа ТК (класс точности 0,5) для включения релейных устройств и контрольно-измерительной аппаратуры. Регуляторы напряжения синхронных генераторов предусмотрено моделировать с помощью устройств быстродействующего возбуждения (БВ) в комбинации с компаундированием генератора по схемам, рекомендованным Министерством Электростанций.

Возможности модели и задачи, замеченные к решению на ней.

Динамическая модель позволит решить целую группу задач непосредственно вытекающих из запросов, возникших при эксплуатации существующей высоковольтной армянской энергосистемы, а также вопросов, возникающих в связи с будущим значительным расширением этой системы.

В первое время, в процессе освоения модели, намечается проведение следующих проверок:

1. проверка устойчивости системы при защите с неселективными отсечками;

2. исследование совместной работы гидрогенераторов, снабженных различными регуляторами напряжения;

3. работа системы при сбросах и набросах нагрузки;

4. анализ аварий и поведение защиты при длительных качаниях, имевших место в системе Арменэнерго.

Тема первой задачи имеет непосредственное практическое значение, так как такого рода защита применяется в системе Арменэнерго. Исследование на модели позволит произвести анализ работы этой защиты при авариях, имевших место в системе Арменэнерго, и позволит установить пути усовершенствования такого рода защиты, а также уточнить методику расчетов. Кроме решения непосредственных задач, возникших в системе Арменэнерго, будут сделаны выводы, имеющие общий интерес и значение для всех систем в Советском Союзе.

Тема второй задачи обусловлена тем, что в системе Арменэнерго имеются самые различные регуляторы напряжения. Представляется весьма интересным экспериментально проверить влияние различия в типах регуляторов или поведение в установившихся и неуставившихся режимах. Полученные здесь выводы могут представить большой практический интерес для системы Арменэнерго и могут быть интересны с чисто теоретической стороны для анализа работы регуляторов различных типов в электрической схеме.

Тема третьей задачи весьма важна, так как в системе Арменэнерго будет применена автоматическая разгрузка по частоте и автоматическое деление системы при возникновении режимов, опасных

для системы в целом. После развития системы Арменэнерго и появления в ней протяженных линий электропередач, вопросы автоматической разгрузки и деление системы на части будут особенно серьезными. Динамическая модель позволит провести полное исследование комплекса, возникающих здесь вопросов. Кроме того, динамическая модель позволит повторить те опыты, которые в настоящее время проводятся в системе Арменэнерго и расширит условия проведения этих опытов. Опыты на модели могут быть проведены в самых широких диапазонах изменений сбросов и набросов, в том числе и в таких случаях, которые будут приводить к нарушению устойчивости системы к недопустимо глубоким, длительным посадкам напряжения и частоты.

Тема четвертой задачи. В системе Арменэнерго имели место аварии, связанные с длительными качаниями. Провести анализ этих аварий исключительно аналитически представляется весьма затруднительным. Динамическая модель позволит выяснить все вопросы такого рода и сделать выводы о необходимых мероприятиях по предотвращению такого рода аварий. Помимо чисто практической стороны, эти исследования на модели будут иметь и теоретический интерес—позволят проверить допущения, принимаемые в существующих расчетных методиках.

Гидроэлектрическая лаборатория Водно-Энергетического Института

Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 5 X 1949

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирпичев М. В. и Михеев М. А.—Моделирование тепловых устройств. Изд. АН СССР, 1936.
2. Бриджмен П.—Анализ размерностей. ОНТИ, 1934.
3. Гутенмахер Л. И.—Электрическое моделирование (Электронинтегратор). Изд. АН СССР, 1943.
4. Зегжда А. П.—Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. Стройиздат Москва—Ленинград, 1933.
5. Белаши П. М.—К вопросу о моделировании в электротехнике. „Электричество“ № 9, 1939.
6. Веников В. А.—Моделирование электрических систем при помощи вращающихся машин. „Электричество“, № 9, 1939.
7. Веников В. А.—Изучение электрических систем на моделях с вращающимися машинами. „Электричество“, № 2, 1941.
8. Костенко М. П. и Трейвиш Е. Д.—Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости. Тр. ЛПИ № 1, 1946.
9. Егиазаров И. В.—Теория подобия и применение законов подобия к явлениям неустановившегося движения. Изв. АН Арм.ССР (Естеств. науки), № 3,3, 1947.
10. Веников В. А.—Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. „Госэнергиздат“, 1949.

Հ. Ա. Արամայան, Խ. Ք. Փալյան

ՀԻՂՐՈՆԵՆԵՐԳՈՍԻՍԵՄՏՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄՈԴԵԼԱՑՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հիղրոնեկարասիստեմների աշխատանքի հաշվարկման հետ կապված ավելի ու ավելի բարդացող և բացառապես մեծ աշխատանք պահանջող խնդիրների լուծման գոյություն ունեցող անալիտիկ եղանակների քննադատական ակնարկից հետո, հոգվածուժ ապացուցվում է այդ խնդիրների լուծման նոր մեթոդներ կիրառելու անհրաժեշտությունը:

Տեսութայան և փորձի սերտ կապը պահանջում է ֆիզիկական մոդելացման մեթոդների կիրառում:

Աշխատանքում ցույց է տրվում, որ էլեկտրական սիստեմների կոմպլեքս դինամիկ մոդելները կարող են ավելի արդյունավետ լուծում ապահովել և ստեղծում են հզոր հիղրոնեկարասիստեմների բոլոր մասերում տեղի ունեցող պրոցեսների փոխազդեցությունը հաշվի առնելու լայն հնարավորություններ:

Ջրա-էներգետիկ ինստիտուտի հիղրոնեկարակ լաբորատորիայում ֆիզիկական նամանակյան թեորիան և մոդելացումն էլեկտրատեխնիկայում յուրացնելուց հետո ընտրված էր հիղրոնեկարասիստեմի մոդելացման ինքնուրույն ուղի: 1948 թվի վերջերին կազմված էր մոդելի էսքիզային պրոեկտ, որը հիմնականում ընդգրկում է այն խնդիրները, որոնք անմիջականորեն զբաղում են Հայաստանի հիղրոնեկարակայի առաջ:

Հիղրավիճակի և մեխանիկական մասի մոդելացման մեթոդները վաղուց մշակված են և լայնորեն կիրառվում են լաբորատորիայում:

Հոգվածուժ բերվում է հիղրոնեկարասիստեմի էլեկտրական մասի մոդելացման թեորիայի հիմնական դրույթների և թեորեմների համառոտ ակնարկ. բերված է նաև լաբորատորիայում կառուցվող հիղրոնեկարասիստեմի դինամիկ մոդելի հիմնական ավայանների պրոեկտը:

Հոգվածի վերջում թվարկվում են մոդելի հնարավորությունները և սահմանվում այն խնդիրները, որոնք բխում են դրույթյուն ունեցող Հայկական բարձր լարման էլեկտրասիստեմի շահագործման դեպքում առաջ եկած պահանջներից. թվարկվում են նաև կառուցվող մոդելի վրա լուծման համար նախատեսված խնդիրները: Այդ խնդիրներն են.

1. սիստեմի աշխատանքը բեռնաթափման և բեռնավորման դեպքում.
2. սիստեմի կայունությունը ստուգումը կիրառվող պաշտպանական մեթոդների դեպքում.
3. տարբեր կարգավորիչներ ունեցող հիղրոնեկարասիստեմների համատեղ աշխատանքի հեռավորումը.
4. վթարների անալիզը և պաշտպանության բնույթը երկարատև տատանումների դեպքում:

