

ГИДРОЛОГИЯ

Б. Д. Зайков

Испарение с поверхности озера Севан*

Испарение с поверхности озера Севан количественно преобладает над всеми остальными элементами его водного баланса, что заставляет уделять ему особое внимание. Даже при сравнительно небольших относительных ошибках в определении этой величины, абсолютные ошибки могут достигать значений некоторых других элементов водного баланса, как например, поверхностного и подземного стока из озера. К сожалению, методика непосредственного определения или теоретического расчета испарения с больших водных пространств еще слабо разработана, а общепринятые, проверенные на практике, эмпирические формулы отсутствуют. Поэтому, в каждом отдельном случае, приходится подходить к определению величины испарения разными, взаимно контролирующими друг друга способами.

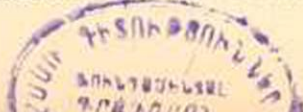
Учитывая вышесказанное, Севанское гидрометбюро поставило в 1927—30 г. г. специальные исследования по испарению, которые имели целью: 1. установление опытным путем зависимости испарения от гидрометеорологических факторов, его обуславливающих и 2. выявление численных значений этих факторов непосредственно для всей поверхности озера.

Для решения первой задачи в различных частях озера (г. Севан, о-в Севан, бухта Глаголь и с. Загалу) были организованы четыре испарительные станции, оборудованные пловучими испарителями Лермантова-Любославского и метеоустановками, на которых дополнительно велись наблюдения по полной программе станций II разряда. Не останавливаясь здесь на описании произведенных исследований, опубликованных в работе В. К. Давыдова [1], приведем лишь выведенную на основе этих исследований следующую формулу испарения:

$$E = 0,64 \, n (e_0 - e_{10}) (1 + 0,125 \, w_{000}) \quad (1),$$

где E — испарение за месяц в мм, n — число дней в месяце, e_0 — максимальная упругость пара по температуре воды в мм,

* Работа выполнена автором в ВЭНИ АН Арм. ССР в связи с расчетом водного баланса озера за 1925—45 г. г.



Общий подход к решению поставленной задачи, принятый Давыдовым, хотя и является правильным, но все же нельзя иметь полной уверенности в том, что выведенная им формула дает величину испарения с поверхности озера достаточно близкую к действительной. Анализируя причины возможных в данном случае отклонений можно выделить следующие основные факторы, влияющие на точность расчета испарения:

1. наличие у испарителей, а также у рам, на которых они устанавливаются, бортиков, защищающих от ветра поверхность воды, обычно влияет в сторону уменьшения испарения, но в некоторых случаях, вследствие увеличения завихрения, возможен и обратный эффект;

2. смачивание внутренних стенок испарителя, наблюдающееся даже при небольшой волне и при раскачивании пловучего испарителя, могущее повысить испарение на величину до 5%;

3. отсутствие в испарителе эффекта ветра—волны, при известном развитии приводящей к срыву гребня и распылению в воздухе, вызывающих добавочное испарение;

4. различие в условиях турбулентного перемешивания вследствие различия в параметрах шероховатости;

5. возможное различие в градиентах влажности на высоте 0—10 см в испарителе (особенно при ветрах, дующих с берега, у которого установлен испаритель) и над поверхностью озера.

Хотя влияние перечисленных выше факторов и не одного знака, и потому не исключена возможность взаимной компенсации, все же вопрос о применимости выведенной Давыдовым формулы для расчета испарения с открытой поверхности озера Севан остается открытым.

Это прекрасно учитывал и сам автор формулы и потому прибегнул к контрольному расчету испарения по методу теплового баланса. К сожалению, специальных актинометрических наблюдений на озере Севан почти не велось и при расчетах отдельных элементов теплового баланса пришлось пользоваться далеко несовершенными эмпирическими формулами, некоторые из которых, как например формулы излучения с водной поверхности, дают результаты, расходящиеся до 100%. Вызывает сомнение и величина конвекционного теплообмена, определявшаяся по формуле Шулейкина. Поэтому, произведенный Давыдовым расчет испарения по тепловому балансу не является убедительным.

В данном случае в целях контроля решено было обратиться к существующим теоретическим формулам, выведенным для расчета испарения в условиях больших водных пространств. Из числа последних мы остановились на известной формуле Свердрупа, удачная попытка применения которой к расчету испарения с поверхности Каспийского моря была произведена В. К. Давыдовым [2].

Формула Свездрупа, выведенная из уравнения турбулентной диффузии, имеет вид:

$$E = \frac{0,216 \, n \, (e_0 - e_{z_1}) \, w_{z_2}}{0,0872 \, \lg \frac{z_1 + z_0}{z_0} \lg \frac{z_2 + z_0}{z_0} + \Delta z \, w_{z_2}} \quad (3),$$

где E — испарение за месяц в мм, n — число дней в месяце, e_0 — максимальная упругость пара при температуре поверхности воды в мм, e_{z_1} — абсолютная влажность воздуха в мм на высоте z_1 (см) от поверхности воды, w_{z_2} — скорость ветра на высоте z_2 (см) в м/сек., z_0 — шероховатость водной поверхности в см и Δz — толщина пограничного (ламинарного) слоя в см.

Серьезным препятствием для широкого практического применения этой формулы к расчету испарения с водной поверхности является отсутствие разработанной методики для определения средних значений параметров z_0 и в особенности Δz .

Шероховатость водной поверхности, как известно, зависит от скорости ветра и носит характер подвижной волнистой шероховатости, т. е. вместе с воздушным потоком, в одном и том же направлении, передвигается и ветровая волна, в силу чего снижается и по-верхностное трение.

Параметр шероховатости определяют обычно путем одновременного измерения скоростей ветра на одной и той же вертикали.

Логарифмическое выражение для изменения скорости ветра с высотой имеет вид:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\lg \frac{z_1}{z_0}}{\lg \frac{z_2}{z_0}} \quad (4),$$

откуда

$$\lg z_0 = \frac{w_2 \lg z_1 - w_1 \lg z_2}{w_2 - w_1} \quad (5),$$

где w_1 — скорость ветра на высоте z_1 от поверхности воды, w_2 — то же на высоте z_2 и z_0 — параметр шероховатости.

Эпизодические наблюдения над профилем ветра в океанических условиях, обработанные Росби, показали, что в случае быстро меняющихся условий волнения, параметр z_0 может достичь очень высоких величин (до 20 см), но при умеренных устойчивых ветрах поверхность моря как бы приспосабливается к тому, чтобы дать возможность воздуху передвигаться над ней наиболее экономичным образом, и параметр волнения колеблется в пределах 0,35—0,85 см, составляя в среднем около 0,6 см.

Аналогичного рода наблюдения, поставленные П. П. Кузьминым [3] на Белом и Каспийском морях показали, что начиная от скорости 3 м/сек. и выше, величина z_0 при устойчивых ветрах дей-

ствительно остается постоянной и не зависит от скорости ветра. Те же наблюдения показали, что в условиях одного и того же ветра величина параметра z_0 различна для разных водоемов и даже для различных участков одного и того же водоема, что зависит, видимо, от морфологических особенностей каждого водоема, а, следовательно, и от неодинакового состояния волнения, вызываемого ветром.

Так, для Белого моря в районе о-ва Средние Луды $z_0 = 1,5$ см (большие глубины), а в береговой полосе Кандалакшского залива $z_0 = 0,5$ см; для Каспийского моря в районе о-ва Чечень (на мелководье) $z_0 = 0,15$ см.

Специальных наблюдений над профилем ветра на Севане, как известно, не велось, и так как для расчета испарения необходимо осредненное как по времени, так и по поверхности моря значение z_0 , то указанные выше эпизодические наблюдения, относящиеся к тому же в большинстве случаев к океаническим условиям, использовать не представилось возможным. В данном случае было поступлено так, как поступил Свердруп в своей первой работе, приняв приближенное значение параметра шероховатости равным $1/30$ средней (или $1/40$ максимальной) высоты волны. Основанием к этому явились опыты Прандтля, нашедшего, что для некоторых типов искусственно полученных поверхностей, путем приклеивания зерен песка различной крупности к гладкой поверхности, параметр шероховатости равен около $1/30$ диаметра зерна.

Высота волны рассчитывалась, исходя из формулы В. Г. Андриянова [4]:

$$h = 0,0208 w^{3/4} D^{1/3} \quad (6),$$

где h — высота волны в м, w — скорость ветра в м/сек. и D — длина разгона в км.

Средняя по протяжению разгона высота волны определялась как

$$h_{\text{ср.}} = \frac{\int_0^D h \cdot dD}{D} = 0,0156 w^{3/4} D^{1/3} \quad (6'),$$

а средняя высота волны для всего водоема вычислялась как среднее арифметическое из значений по формуле (6') для наибольшего и наименьшего разгонов по водоему.

Учитывая наличие на озере Севан крутых приглубых берегов, вызывающих интерференцию волн и образование толчей, в полученную по этой формуле величину был введен коэффициент $K=1,3$, отражающий большую высоту волн толчей (для правильной стоячей волны — „волны плеса“ $K=2,0$).

Положенные в основу этого расчета данные и полученные ре-

зультаты, вместе с аналогичными данными по морям Каспийскому и Аральскому, которые будут использованы ниже, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет средней высоты волны и параметра z_0

	оз. Севан	Каспийское море	Аральское море
Наибольший разгон D макс., км	70	1000	350
Наименьший разгон D мин., км	15	300	200
Средняя скорость ветра w , м/сек. . . .	3,5	5,0	3,5
Средняя высота волны по протяжению D макс., м	0,31	1,2	0,52
Средняя высота волны по протяжению D мин., м	0,18	0,78	0,44
Средняя высота волны по зеркалу, м . . .	0,24	0,99	0,48
Принятая средняя высота волны по зеркалу h ср., м	0,35	1,0	0,5
Параметр шероховатости $z_0 = 1/30 \cdot \frac{1}{h \text{ ср.}}$ h ср. 100 см	1,2	3,3	1,7

Как видно из этой таблицы, значение параметра z_0 для Севана получилось 1,2 см, а для Каспийского и Аральского морей—соответственно 3,3 и 1,7 см.

Еще более сложной задачей является определение толщины пограничного слоя. Толщина его непрерывно меняется, в известные моменты сходя даже на-нет, но при вычислении средних величин испарения, без больших погрешностей, ее можно принять постоянной, как это и делается пока всеми исследователями.

Приближенное значение толщины пограничного слоя было рассчитано по нижеследующей формуле, выведенной П. П. Кузьминым [5] из условий равенства переноса водяного пара внутри турбулентной зоны переносу через слой диффузии:

$$\Delta z' = 0,0863 \lg \frac{z_1 + z_0}{z_0} \lg \frac{z_2 + z_0}{z_0} \frac{(e_0 - e)}{(e - e_{z_1}) w_{z_2}} \quad (7)$$

или более точно:

$$\Delta z = 0,0863 \lg \frac{z_1 + z_0}{z_0 + \Delta z'} \lg \frac{z_2 + z_0}{z_0} \frac{(e_0 - e)}{(e - e_{z_1}) w_{z_2}} \quad (8),$$

где e —абсолютная влажность воздуха на верхней границе пограничного слоя в мм. Значение последней было определено экстраполяцией кривой распределения влажности по вертикали, построенной на основе градиентных наблюдений на острове Севан.

В соответствии с данными наблюдений ($z_1 = 200$ см, $z_2 = 900$ см, $w_{z_2} = 3,5$ м/сек., $e_0 = 9,5$ мм, $e = 7,7$ мм и $e_{z_{100}} = 6,1$ мм) по вышепри-

веденным формулам 7 и 8 были определены значения $\Delta z' = 0,179$ см и $\Delta z = 0,173$ см, или округло $\Delta z = 0,17$ см.

Для сравнения укажем, что для Каспийского и Аральского морей, величина испарения с поверхности которых может считаться более или менее точно установленной (табл. 4), значения Δz , вычисленные из формулы испарения Свердрупса, получились соответственно равными 0,18 и 0,16, т. е. близкими к определенному выше для Севана.

Определив указанными выше способами значения параметров z_0 и Δz , выражение:

$$\frac{0,216}{0,0872 \lg \frac{z_1+z_0}{z_0} \lg \frac{z_2+z_0}{z_0} + \Delta z w_{z_2}} \quad (9)$$

в формуле Свердрупса можно заменить множителем

$$A = f(w_{z_2}) \quad (10)$$

В таком случае формула Свердрупса примет вид обычной одночленной формулы испарения:

$$E = A n (e_0 - e_{z_1}) w_{z_2} \quad (11)$$

Значения входящего в эту формулу переменного множителя A в функции от скорости ветра могут быть определены по предварительно составленной вспомогательной таблице (табл. 2) или по графику $A = f(w_{z_2})$, представленному на рис. 1.

Таблица 2

Таблица значений $A = f(w_{z_2})$ (для условий Севана)

м/сек.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,	0,240	0,236	0,232	0,228	0,224	0,219	0,215	0,211	0,208	0,205
3,	0,202	0,199	0,196	0,193	0,190	0,187	0,184	0,181	0,178	0,176
4,	0,174	0,171	0,169	0,167	0,165	0,163	0,161	0,159	0,157	0,155
5,	0,153	0,151	0,149	0,147	0,145	0,144	—	—	—	—

Путем подстановки в формулу (11) месячных значений разностей упругости водяного пара и скорости ветра, а также переменного коэффициента A , были получены месячные и годовые суммы испарения с поверхности озера за каждый год периода 1927—30 г. г. Средние за четырехлетний период величины месячных сумм испарения приведены в табл. 11, а годовые суммы испарения за каждый год в отдельности — в табл. 3 в сопоставлении с аналогичными данными, полученными по формуле Давыдова и по водному балансу озера.

Таблица 3

Испарение с поверхности оз. Севан, в см

Годы	По формуле Давыдова	По формуле Свердрупа	По водному балансу	Среди.
1927	83	80	83	82
1928	76	74	77	76
1929	88	83	80	84
1930	92	94	89	92
Средн.	85	83	82	83

Как видно из таблицы, величины испарения, определенные по эмпирической формуле Давыдова и теоретической формуле Свердрупа, получились достаточно согласными и расходятся в среднем не более чем на 2,5%, а в отдельные годы отклонения не превышают 6% (1929 г.). Не меньшее согласие наблюдается и между величинами, определенными по указанным формулам, с полученными по водному балансу озера. При этом лучшее совпадение обнаруживают данные расчета по формуле Свердрупа, которые отклоняются от данных по водному балансу в среднем несколько более 1%, с колебаниями в отдельные годы от +4,0% (1928 г.) до -5,6% (1930 г.), в то время как рассчитанные по формуле Давыдова показывают несколько большие величины отклонений, соответственно 3,6%, 0% (1927 г.) и -10% (1929 г.).

Как уже выше указывалось, каждая из принятых для расчета испарения формул обладает теми или иными присущими ей недостатками; не лишен последних и расчет испарения по водному балансу, ошибки в определении которого могут проистекать в основном из-за недостаточной точности учета атмосферных осадков, играющих весьма существенную роль в приходной части водного баланса (около 40%) и в меньшей степени от точности учета притока воды в озеро и других элементов. Однако, несмотря на имеющиеся недочеты, все три способа подсчета испарения с поверхности озера дают достаточно близкие результаты и контролируют друг друга. Само собой разумеется, что наши расчеты стали бы еще более убедительными, если бы удалось показать, что принятые для расчета испарения с поверхности озера Севан формулы приложимы и к другим водоемам, как, например, Каспийское и Аральское моря. Величины испарения с этих водоемов могут считаться более или менее точно установленными по их водному балансу [6,7], а кроме того, по этим водоемам имеются в настоящее время гидрометеорологические данные (табл. 4), относящиеся так же, как и на Севане, к открытой водной поверхности.

Таблица 4
Испарение с поверхности Каспийского и Аральского морей

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Каспийское море (1904, 14—19, 24—29, 31—36 г.г.)													
$e_0 - e_{200}$, мм	1,5	1,3	1,3	1,9	3,1	4,5	6,0	6,4	5,9	4,1	2,9	1,8	3,4
w_{100} , м/сек.	5,5	5,6	5,3	5,0	4,6	4,5	4,6	4,8	5,3	5,4	5,9	5,8	5,2
E , мм	50	46	34	16	33	91	127	155	144	124	101	67	988
Аральское море (1912—17, 26—39 г.г.)													
$e_0 - e_{200}$, мм	2,5	2,1	1,5	0,5	2,5	4,2	5,4	6,9	7,1	5,5	4,1	3,0	3,8
w_{100} , м/сек.	3,0	3,6	3,7	3,8	3,9	3,6	3,5	3,4	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
E , мм	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	930

Произведенные в указанном направлении исследования показали, что формула Давыдова, если абсолютную влажность взять на обычной высоте 200 см, где она фактически и наблюдалась над озером, принимает вид:

$$E = 0,47 n (e_0 - e_{200}) (1 + 0,125 w_{100}) \quad (12)$$

и представляет частный случай следующей формулы испарения, удовлетворяющей данным всех трех водоемов — оз. Севан, Каспия и Арала:

$$E = A n (e_0 - e_{200}) (1 + 0,125 w_{100}) \quad (13)$$

Коэффициент A в этой формуле — величина переменная и зависит от шероховатости водной поверхности.

Зависимость $A = f(z_0)$ графически представлена на рис. 2 и аналитически выражается так:

$$A = 0,14 \lg z_0 + 0,46 \quad (14)$$

Использованные при выводе формулы (14) данные приведены в табл. 5.

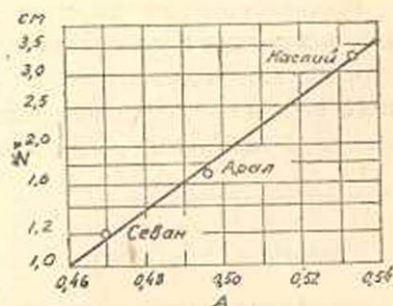
Рис. 2. График зависимости $A = f(z_0)$

Таблица 5

Водоем	Среднее суточное испарение, мм	$e_0 - e_{200}$, мм	w_{100} , м/сек.	z_0 , см	A
Каспийское море	2,71	3,0	5,5	3,3	0,534
Аральское море	2,55	3,6	3,3	1,7	0,497
оз. Севан	—	—	—	1,2	0,470

Переход от наблюдаемой на Каспии абсолютной влажности воздуха e_{600} к требуемой формулой e_{200} был произведен по нижеследующей зависимости, выведенной по данным серийных градиентных наблюдений Кузьмина на Каспийском море для условий установившегося процесса переноса водяных паров от поверхности или снизу вверх (основной тип испарения):

$$\frac{e_z}{e_{200}} = 1 - 0,115 \lg \frac{z}{200} \quad (15),$$

где e_z — абсолютная влажность в мм на высоте z [см] от поверхности воды.

На Аральском море, где градиентных наблюдений над абсолютной влажностью не велось, а высота точки наблюдений (300 см) мало отличается от требуемой формулой, переход произведен приближенно по аналогии с соответствующими данными по Севану и Каспию.

Приведение скорости ветра к высоте 900 см было произведено без больших погрешностей с помощью табл. 6, составленной по данным С. И. Руденко, обработавшим наблюдения над профилем ветра на Каспии и ряде других водоемов.

Таблица 6.

Изменение скорости ветра над водной поверхностью с высотой
(в долях от скорости ветра на высоте 900 см)

Высота в см	600	700	800	900	1000	1100
Скорость в долях	0,945	0,97	0,98	1,00	1,01	1,025

Вычисленные по формуле (13) месячные, а по ним и годовые суммы испарения с поверхности оз. Севан, Каспийского и Аральского морей, как видно из табл. 7, почти в точности совпадают с величинами испарения, определенными для Севана по формуле Давыдова, и для двух остальных водоемов — по водному балансу.

Таблица 7

Водоем	Метод расчета	Испарение, см	Метод расчета	Испарение, см
оз. Севан	Формула Давыдова	85	Формула (13)	85
Каспийское море	водный баланс	99	" "	98
Аральское море	" "	93	" "	92

Из вышесказанного следует, что эмпирические формулы двухчленного вида с постоянным коэффициентом A применимы для расчета испарения лишь в тех условиях, для которых они выведены, а пользование ими в иных условиях, при значительных колебаниях этого коэффициента (в рассматриваемых случаях от 0,47 до 0,53), может привести к существенным ошибкам.

Удовлетворительные результаты, получившиеся в свое время для Каспия и Арала [2,7] при пользовании, например, известной формулой Мейера-Тихомирова, объясняются чистой случайностью. Действительно, если по формуле (12) подсчитать величину испарения с Каспия и Арала по непосредственно наблюдаемым данным (табл. 4), то получаются суммы испарения соответственно 96 и 93 см, т. е. близкие к величинам, определенным по водному балансу, а по приведении данных к требуемым формулой высотам, вычисленные величины испарения оказываются сильно заниженными и одинаково равными 87 см.

Что же касается проверки применимости формулы Свердрупа к расчету испарения с поверхности Каспийского и Аральского морей, при условии соблюдения принятых на Севане методов определения основных параметров, то такая проверка могла бы быть произведена только на Каспии, а на Арале, где градиентных наблюдений над влажностью не велось, определить толщину пограничного слоя, принятым на Севане методом, не представляется возможным. Однако, известная устойчивость этого параметра, определенного выше по формуле (8) для Севана ($\Delta z = 0,17$ см), а для Каспия ($\Delta z = 0,18$ см) и Арала ($\Delta z = 0,16$ см) обратным путем, исходя из известной величины испарения и формулы Свердрупа, позволяет в первом приближении принять значение его постоянным для всех трех водоемов и равным $\Delta z = 0,17$ см, т. е. значению, полученному для Севана. Рассчитанные при указанном допущении годовые суммы испарения с поверхности Каспийского и Аральского морей, после предварительного получения месячных величин испарения, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Годовые суммы испарения, см

Водоем	По формуле Свердрупа	По водному балансу	Отклонения в %
Каспийское море	103	99	+4,0
Аральское море	89	93	-4,3

Как видно из таблицы, отклонения вычисленных по формуле Свердрупа величин испарения от определенных по водному балансу в общем невелики и заключаются в пределах $\pm 4\%$. Таким образом формулу Свердрупа с постоянным значением параметра $\Delta z = 0,17$ см можно считать практически приемлемой для расчета испарения с поверхности всех трех рассматриваемых водоемов.

Наличие общих формул испарения достаточно хорошо удовлетворяющих данным всех трех водоемов—Каспийского и Аральского морей и оз. Севан, является существенной гарантией того, что найденные выше величины испарения с поверхности озера Севан близки к действительным.

Какие же данные следует принять окончательно для расчета?

Результат расчета испарения с поверхности озера Севан по формуле Свердрупа (табл. 3) как в среднем за период, так и за отдельные годы, обнаруживает наилучшее совпадение со средним из всех трех принятых способов расчета—по формулам Давыдова и Свердрупа и по водному балансу, поэтому формула Свердрупа и принимается нами для дальнейших расчетов, как дающая наиболее вероятное значение искомой величины.

Поставив основной задачей настоящего расчета водного баланса озера самостоятельное определение каждого из его элементов, для определения величин испарения за последующие 1931—45 г. г. необходимо было теми или иными путями восстановить значения основных гидрометеорологических факторов, его обуславливающих—температуры поверхности воды, абсолютной влажности воздуха и скорости ветра, т. к. соответствующих наблюдений непосредственно на акватории озера в эти годы не велось.

Температура поверхности воды была восстановлена приближенно по графику, связывающему месячные значения температуры поверхности

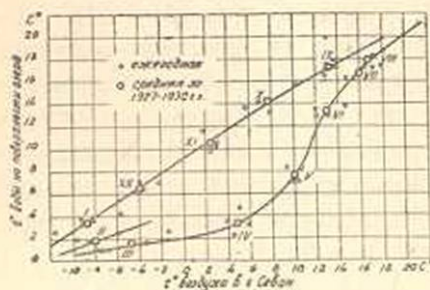


Рис. 3. График связи между температурой воды на поверхности озера Севан и температурой воздуха в г. Севан.

поверхности воды с температурой воздуха в г. Севан, построенному по данным 1927—30 г. г. (рис. 3).

Абсолютная влажность над озером получена как средняя из ее значений, определенных по графикам зависимости абсолютной влажности над озером с абсолютной влажностью на метеорологических станциях в г. Севан и на о-ве Севан (рис. 4 и 5).

Скорость ветра рассчитана по графику, связывающему средние показания четырех действовавших

в 1931—45 г. г. метстанций (о-в Севан, Шоржа, Мартуни и Басар-

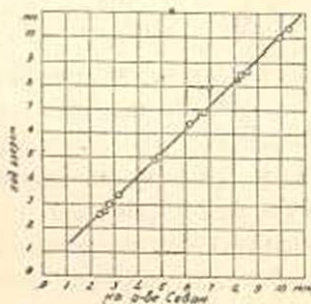


Рис. 4. График связи абсолютной влажности воздуха над озером Севан и на о-ве Севан.



Рис. 5. График связи абсолютной влажности воздуха над озером Севан и в г. Севан.

гечар-Мазра) со средними скоростями пяти станций (о-в Севан, Норадуз, Шоржа, Мартуни и Басаргечар), по которым определялась скорость ветра в 1927—30 г. г. (рис. 6).

Результаты подсчета в виде средних за весь период значений указанных элементов, вместе со средними их значениями за период 1927—30 г. г., приводятся в табл. 9. Здесь же приводятся вычисленные по температуре поверхности воды, максимальные упругости пара и значения разностей упругости пара над озером.

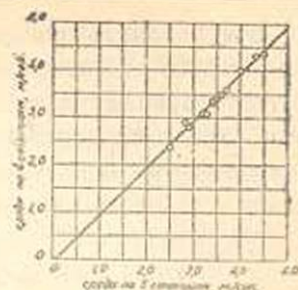


Рис. 6. График связи средних скоростей ветра по 4-м станциям (о-в Севан, Шоржа, Мартуни и Басаргечар) и по 5 станциям (те же плюс Норадуз).

Таблица 9

Гидрометеорологические факторы испарения

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Температура воды на поверхности озера, °C													
27—30	3,4	1,8	1,5	3,3	7,6	13,2	16,8	17,9	17,2	14,2	10,5	6,4	9,5
1927—45	3,6	2,1	1,5	2,9	6,8	12,5	16,8	18,2	16,9	14,0	10,0	5,8	9,3
Максимальная упругость водяного пара, мм													
1927—30	5,8	5,2	5,1	5,8	7,8	11,4	14,3	15,4	14,7	12,2	9,6	7,2	9,6
1927—45	6,0	5,3	5,1	5,7	7,4	10,9	14,4	15,7	14,5	11,9	9,2	7,0	9,4
Абсолютная влажность воздуха над озером, мм (из высоты 2 м)													
1927—30	2,6	2,8	3,3	5,0	6,9	8,7	10,4	10,0	8,5	6,5	5,0	3,4	6,1
1927—45	2,7	2,9	3,2	4,7	6,5	8,5	10,5	10,2	8,6	6,4	4,8	3,3	6,0
Скорость ветра над озером, м/сек. (на высоте 9 м)													
1927—30	3,4	4,5	4,0	3,2	2,5	2,9	3,7	2,8	3,4	3,3	3,6	4,3	3,5
1927—45	4,2	4,4	3,8	3,3	2,6	2,8	3,4	3,2	3,2	3,4	3,7	4,3	3,5
Разность упругостей пара над озером, мм													
1927—30	3,2	2,4	1,8	0,8	0,9	2,7	3,9	5,4	6,2	5,7	4,6	3,8	3,5
1927—45	3,2	2,5	1,9	1,0	0,9	2,4	3,9	5,5	5,9	5,6	4,5	3,7	3,4

Как видно из этой таблицы, значения основных факторов, обуславливающих испарение—разностей упругости пара над озером и скоростей ветра за оба сравниваемых периода, очень близки и, следовательно, рассчитанные по ним величины испарения за оба периода должны быть примерно одинаковы.

Восстановить значения основных гидрометеорологических элементов за 1925—26 г. г. не представилось возможным за отсутствием соответствующих данных наблюдений, и величины испарения за эти годы были определены по водному балансу. Результаты подсчета испарения по формуле Свердрупа (исключая 1925—26 г. г.) в виде годовых сумм за весь период 1925—45 г. г. приведены в табл. 10.

Таблица 10

Годовые суммы испарения с поверхности озера Севан, см

Годы	Испарение	Годы	Испарение	Годы	Испарение	Годы	Испарение
1925	93	1930	94	1935	74	1940	80
1926	98	1931	86	1936	74	1941	93
1927	80	1932	83	1937	68	1942	86
1928	74	1933	79	1938	81	1943	83
1929	83	1934	82	1939	84	1944	84
						1945	79
						Средн.	83

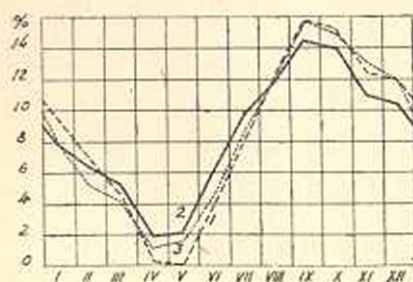


Рис. 7. Годовой ход испарения с поверхности оз. Севан (1—по формуле Давыдова, 2—по формуле Свердрупа 3—по водному балансу).

Средняя за 21 год величина испарения с поверхности озера Севан определилась в 83 см. Наибольшее испарение (98 см) наблюдалось в 1926 г. и наименьшее (68 см)—в 1937 г.

Распределение годовой суммы испарения по месяцам, вычисленное различными способами, в среднем за период 1927—30 г. г., представлено в табл. 11 и изображено на графике (рис. 7).

Таблица 11

Месячные суммы испарения с поверхности озера Севан

Метод расчета	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
В миллиметрах слоя													
По ф-ле Давыдова	80	58	38	2	-1	32	67	104	135	129	105	101	850
По ф-ле Свердрупа	64	51	42	16	17	50	80	98	120	115	90	85	828
по водному балансу	64	42	34	10	13	37	71	97	130	123	108	99	828
В процентах от годовой суммы													
По ф-ле Давыдова	9,4	6,8	4,5	0,2	0,1	3,8	7,9	12,2	15,8	15,2	12,4	11,9	100
По ф-ле Свердрупа	7,7	6,2	5,1	1,9	2,1	6,0	9,7	11,8	14,5	13,9	10,8	10,3	100
по водному балансу	7,7	5,1	4,1	1,1	1,6	4,4	8,6	11,8	15,7	14,9	13,0	12,0	100

Все три способа подсчета, как видно из табл. 11 и рис. 7, дают достаточно согласный годовой ход испарения с минимумом в апреле—мае и максимумом в сентябре—октябре.

В качестве наиболее вероятного годового хода испарения с поверхности озера Севан принимаем средний из всех трех способов подсчета (табл. 12).

Таблица 12

Испарение с поверхности озера Севан

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
$\varphi/10^{\circ}$	8,3	6,0	4,6	1,1	1,2	4,7	8,7	12,0	15,3	14,7	12,0	11,4	100
в мм	69	50	38	9	10	39	72	99	127	122	99	94	828

Хотя приведенный выше годовой ход испарения с поверхности озера выведен всего за четыре года, но его все же можно считать типичным, так как значения основных гидрометеорологических факторов, обуславливающих величину испарения за эти четыре года, как видно из табл. 9, близки к их значениям за более длительный ряд 1927—45 г.г.

Поступило 20 IV 1949.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В. К.—Испарение с поверхности оз. Севан. Мат. по исследованию оз. Севан и его бассейна, ч. II, вып. 2. Ленинград, 1935.
2. Давыдов В. К.—Испарение с поверхности Каспийского моря. Тр. КАСП, вып. XII, Москва—Ленинград, 1941.
3. Кузьмин П. П.—О метеорологических условиях теплообмена между морем и прилегающим слоем воздуха. Метеорология и гидрология, № 4, 1946, Ленинград.
4. Андреев В. Г.—Ветровая волна озеровидных водоемов. Изв. НИИГ, т. XXV, Ленинград, 1939.
5. Кузьмин П. П.—Теплоотдача моря в воздух путем испарения и конвекции. ДАН СССР, новая серия, т. XXI, № 9, 1938.
6. Зайков Б. Д.—Водный баланс Каспийского моря. Тр. КАСП, вып. XII, Москва—Ленинград, 1941.
- Зайков Б. Д.—Современный и будущий водный баланс Аральского моря. Тр. НИУ ГУГМС СССР, сер. IV, вып. 39, Ленинград, 1946.

Բ. Դ. ՋԱՅԿՈՎ

ԳՈԼՈՐՇԻԱՅՈՒՄԸ ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅՑՔԻՑ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Սեանա լճի ազատ մակերևույթի վրա հիդրոմետերոլոգիական հաստիկ զիտողություններ կատարվել են 1927—30 թվերի ընթացքում (աղյուսակ 9): Այդ ժամանակամիջոցի համար լճի մակերևույթից զուրբ խաղճման քանակը որոշվել է Վ. Կ. Դավիդովի էմպիրիկ բանաձևով (բանաձև 1), որը դուրս է բերված լողացող զուրբ խաղճուցիչի վրա կատարված զիտողությունների հիման վրա և Սվերդրուպի տեսական բանաձևով (բանաձև 13): Այդ երկու բանաձևով ստացված զուրբ խաղճման քանակի արժեքները բավականին մոտ են ջրային բալանսի հավասարումով ստացված զուրբ խաղճման քանակին (աղյուսակներ 3 և 11, նկար 7): Ինչպես հաջողվել է ցույց տալ, Վ. Կ. Դավիդովի բանաձևը, փոփոխական Δ գործակցով (բանաձևեր 13 և 14) և Սվերդրուպի բանաձևը սահմանամերձ շերտի հաստություն հաստատուն արժեքով ($\Delta z = 0,17$ սմ) բավականաչափ ճիշտ են որոշում զուրբ խաղճման մեծությունը ոչ միայն Սեանա լճի մակերևույթից, այլ և ուրիշ ջրային ավազաններից, ինչպես օր. Կասպից և Արալյան ծովերը: Վերջինների մակերևույթից զուրբ խաղճման քանակը բավականին ճիշտ է որոշվում ջրային բալանսով: Այդ հանդամանքը կարող է երաշխեք ծառայել, որ Սեանա լճի համար որոշված զուրբ խաղճման քանակը մոտ է իրականին: Հաջորդ տարիների ընթացքում (1931—45 թվ.) լճի ազատ մակերևույթի վրա հիդրոմետերոլոգիական զիտողություններ չեն կատարվել: Այդ ժամանակամիջոցի համար զուրբ խաղճման հիմնական ֆակտորները՝ ջրի մակերեսի ջերմաստիճանը, բացարձակ խոնավությունը և քամու արագությունը որոշելու համար կազմված են գրաֆիկներ, որոնք տալիս են լճի վրայի վերահիշյալ արժեքների կապը առափնյա կայաններում դիտված արժեքների հետ (նկար 3—6), որանց անընդհատ զիտողություններ են կատարվել: Այդպիսով 1931—45 թվերի զուրբ խաղճումը որոշված է գրաֆիկորեն: Հիդրոմետերոլոգիական համապատասխան ավյալների բացակայության շնորհիվ 1925—26 թվերի զուրբ խաղճման մեծությունը վերը նշված միջոցով հաշվարկվել էր հաշվել, այդ պատճառով ընդունված է ջրային բալանսի հավասարումից ստացված մեծությունը 21 տարվա համար (1925—ից մինչև 1945 թվ.). Սեանա լճի մակերևույթից զուրբ խաղճման միջին մեծությունը ստացվել է 85 սմ, ամենամեծը (98 սմ) դիտվել է 1926 թվին, իսկ ամենափոքրը (68 սմ)—1937 թվին (աղյուսակներ 10 և 12):

ГИДРОЛОГИЯ

А. Н. Важнов и Г. О. Кирищян

**К вопросу рационализации сети и наблюдений
гидрометеорологических станций на территории
Армянской ССР**

Общее направление гидрометеорологических исследований

Плановое развитие народного хозяйства Армении связано с наиболее эффективным использованием водных ресурсов, которыми относительно бедна территория республики.

Основными отраслями народного хозяйства, прежде всего заинтересованными в точном учете и рациональном использовании стока рек Армении, являются сельское хозяйство и энергетика. Последние ставят следующие задачи перед гидрометеорологической службой:

1. правильный учет естественного стока рек, как в суммарном выражении для отдельных речных бассейнов или гидрологических районов, так и распределения его в течение года, особенно в вегетационный период;

2. надежный прогноз распределения стока с максимально возможной заблаговременностью.

Строительство ирригационных систем, гидроэлектростанций, в том числе и станций сельской энергетики, проектирование мостов и дорожных сооружений, а также их эксплуатация, выдвигают ряд дополнительных требований к гидрометеорологии: характеристика размеров и повторяемости катастрофических паводков, данные о минимальных расходах и их устойчивости в течение года, изучение зимних ледовых явлений на реках и, в частности, шугообразования, изучение стока наносов и русловых процессов, исследование испарения с водной поверхности и с почвы, и ряд других.

Следует отметить также необходимость изучения специфического для горных районов явления селеобразования и связанных с ним катастрофических наводнений. Исследование генезиса этого явления и динамики движения селевых масс необходимо для разработки методики его предсказания, проектирования защитных противоселевых сооружений и правильного планирования и строительства населенных пунктов, мостов и различных гидротехнических сооружений.

Изучение климата и особенностей атмосферных явлений на территории Армянской ССР, кроме перечисленных выше общих с гидрологией задач, имеет и самостоятельные задачи по обслуживанию авиации, сельского хозяйства и энергетике сведениями о текущем

метеорологическом режиме и прогнозами ряда метеорологических элементов.

Разрешение перечисленных выше задач возможно лишь в результате совместной работы метеорологов и гидрологов, на базе правильной организации комплекса гидрометеорологических наблюдений.

Дальнейшее развитие сети гидрометеорологических станций и, в частности, опорной сети должно исходить не только из существующих в данное время потребностей, но и из перспектив дальнейшего развития народного хозяйства и научных исследований в области гидрометеорологии.

Изучение режима малых рек и необходимость предсказания их водоносности требуют развития сети наблюдательских станций на водосборах малых рек и притоков, с площадями в несколько сот и даже в несколько десятков кв. км. Сеть гидрометрических створов должна постепенно распространяться на притоки все с меньшими водосборами.

Такая тенденция к уменьшению изучаемых водосборных площадей, проявляющаяся на всей территории Союза, в условиях маловодной речной сети Армении, выражена особенно отчетливо.

При интенсивном водозаборе на орошение в летний период участки среднего и нижнего течений многих рек мелеют или вовсе остаются без воды. Учет естественного стока в этих условиях возможен только в результате гидрометрических работ на верхних участках и на притоках.

В свою очередь строительство микро-ГЭС также нуждается в гидрологических расчетах и прогнозах по малым рекам, которые могут осуществляться лишь в результате изучения процессов формирования стока в малых водосборах.

Таким образом, при планировании сети наблюдательских станций необходимость изучения малых рек должна рассматриваться не как временное явление, а как состояние устойчивое в перспективе многих лет. При сгущении сети гидрометеорологических станций, особенно в горных условиях, нельзя руководствоваться общими типовыми расстояниями между пунктами.

Сложная орография территории Армении обуславливает большое разнообразие гидрометеорологических условий на сравнительно небольшой территории.

Пересеченность рельефа обуславливает различные климатические зоны как по вертикали, так и по горизонтали. Благодаря этому нередко гидрометеорологические условия смежных районов, расположенных даже на одних и тех же высотах, различны.

Разнообразие речного стока по территории, кроме факторов климатических, определяется также и геологическим строением местности. Преобладание трещиноватых, сильно фильтрующих пород или, наоборот, слабопроницаемого покрова обуславливает то или

ливое распределение атмосферных осадков между поверхностным и подземным стоком. В результате этого имеем большое различие в модулях поверхностного стока даже на площади в несколько десятков кв. км.

Наряду с геологией следует учитывать также и характер растительного покрова, в свою очередь влияющего на режим стока.

Эти обстоятельства делают необходимым очень тщательное рассмотрение вопроса рационального размещения сети гидрометеорологических станций.

Известно, что рационально размещенная сеть станций должна обеспечить возможность интерполяции и экстраполяции результатов фактических наблюдений с заданной точностью*. Необходимо выбрать то минимальное расстояние между станциями, уменьшение которого не могло бы внести существенных уточнений в характеристику гидрометеорологических условий.

Параллельно с расширением сети должно идти и совершенствование техники и повышение качества самих наблюдений. В настоящее время как состав, так и качество наблюдений на гидрометеорологических станциях отстают от требований, предъявляемых к ним народным хозяйством и современным уровнем науки.

К основным недостаткам нужно отнести:

а) недостаточную детализацию хода уровней воды при наличии только наблюдений в 2—3 срока по водомерной рейке и, как следствие, неточность вычисления расходов, особенно в период весенне-летних паводков;

б) недостаточную густоту пунктов наблюдений за осадками и отсутствие необходимого количества самописцев осадков;

в) неудовлетворительное состояние наблюдений за снежным покровом (отсутствие наблюдений в верхних зонах горных хребтов);

г) неудовлетворительное состояние наблюдений за зимними ледовыми явлениями, в частности — за шугой;

д) неудовлетворительное состояние наблюдений за влекомыми наносами;

е) на некоторых метеостанциях, особенно на постах, недостаточно тщательно производятся визуальные наблюдения. Это в первую очередь относится к определению формы и высоты облаков, а также характера осадков.

Развитие метеорологических наблюдений

Вопрос рационального размещения метеорологических станций тщательно изучается научно-исследовательскими учреждениями Главного Управления Гидрометеорологической Службы при Совете Ми-

* Имеется в виду приближенная экстраполяция гидрометеорологических данных при одновременном использовании ряда однородных зависимостей.

нистров СССР. В трудах Главной Геофизической Обсерватории по данному вопросу опубликован ряд исследований.

В. П. Курская [1], изучая вопрос размещения сети дождемерных пунктов, приходит к заключению, что при расстояниях между дождемерными станциями, равных 12 км, ошибка интерполяции в равнинных условиях будет равна 16—18% от месячной суммы осадков.

В горной местности эта ошибка должна быть значительно больше.

Г. Л. Гакен [2], исследуя вопрос размещения станций для учета гроз, приходит к выводу, что такое расстояние между пунктами горной части Крыма равно около 6 км.

Е. И. Абрамова и О. А. Дроздов [3] для учёта снежного покрова в Северном Казахстане рекомендуют расстояние между станциями порядка 10 км. Авторы не касаются вопроса густоты снегомерной сети станций в горных местностях, считая, что там условия еще более сложны и требуются специальные исследования.

Приведенные выше и ряд других работ указывает на насущную необходимость развития сети станций там, где она недостаточно густа и не отвечает тем требованиям, которые предъявляются гидрометеорологической службе.

Метеорологические станции и посты, функционирующие в настоящее время на территории Армении, расположены преимущественно в долинах и предгорьях и не освещают верхние зоны горных хребтов. Между тем установлено, что в республике наибольшее количество осадков выпадает в зоне выше 2—2,5 км над уровнем моря. Поэтому организация дополнительных пунктов наблюдений необходима в высокогорной зоне, где сеть особенно редка. Следует отметить, что существующие станции, благодаря пересеченности рельефа, нередко освещают районы очень малым радиусом. Эти обстоятельства очень затрудняют интерполяцию метеорологических элементов по территории. Достаточно указать, что по существующим данным наблюдений нельзя составить более или менее точную карту распределения осадков, так как интерполяция и экстраполяция данных, особенно по высоте, может привести к большим погрешностям.

Из всего изложенного очевидно, что в условиях сложного рельефа прежде всего необходимо открытие высокогорных станций с полной программой наблюдений, оснащенных самопишущими приборами.

Высокогорные станции необходимо открыть в тех районах, которые в первую очередь подвержены влиянию вторжений свежих воздушных масс.

При размещении высокогорных станций следует учесть и возможность получения связей данных этих станций с данными станций, расположенных ниже по склону и на прилегающей равнине.

Гидрометеорологическая служба Армении в этом направлении сделала значительный шаг, включив в проект развития сети такие

высокогорные станции, как станция на горе Гогаран (Аглаган) в западной части Базумского (Безобдальского) хребта и станция на горе Ерагагат (Уч-Тапалар) в центральной части Гегамского (Агмаганского) хребта.

Однако, в этом проекте не учтено открытие станций на ряде горных хребтов, представляющих не меньший интерес при изучении гидрометеорологических условий республики.

Севанский (Шах-Дагский) хребет, простирающийся вдоль восточной части бассейна Севан, метеорологически совершенно не освещен. Для характеристики водного баланса озера, уточнения карт осадков и стока, крайне необходимо открытие высокогорной станции на этом хребте.

Поскольку в юго-восточной части бассейна озера Севан наблюдается своеобразный режим ветра, в изучении которого в целях прогноза погоды заинтересована и авиация, целесообразно открыть станцию на горе Гинал в южной оконечности Севанского хребта. В совокупности с нижерасположенной станцией Мазра, эта станция позволит получить характеристику изменения метеорологических элементов по высоте.

В южной половине Армении сеть станций значительно реже, чем в остальной части республики. Существующие станции расположены в предгорьях. Не говоря уже о невозможности изучения зонального распределения метеорологических элементов, здесь трудно анализировать даже процессы, происходящие в приземном слое воздуха.

Из всего изложенного явствует, что в южной части Армении крайне необходимо открытие высокогорных станций, причем в первую очередь в районах с очень редкой сетью. Карабахское нагорье метеорологически совершенно не освещено. Поэтому одну станцию целесообразно открыть на горной вершине Гумарчах. Вторую станцию желательно открыть значительно южнее первой, на горе Арамазд Баргушатского хребта.

Для изучения селеобразования в Армении в бассейне Гедара (район города Ереван), по решению ГУГМС, организуется стоково-селевая станция. На первом этапе организации этой станции целесообразно открыть метеорологическую станцию в Дзорахпуре и пост Гямрез перевести в разряд станции, снабдив его самописцем осадков. Наличие этих двух станций и высокогорной станции Ерагагат позволит изучить зональное распределение метеорологических элементов и дать детальную картину осадков, вызывающих паводки в русле реки Гедар.

Решение ряда гидрологических задач связано с обобщением метеорологических элементов. Так, накопление наблюдений за ливнями, особенно в северных районах республики, позволит осуществить краткосрочные прогнозы паводков уже в ближайшие 2—3 года. Опыт разработки генетического метода М. А. Великанова для реки

Касах (работа ВЭИ 1947 г.) показал, что краткосрочный прогноз паводков практически осуществим при условии достаточной густоты пунктов наблюдений за осадками.

Прогнозы паводков особенно необходимы для рек Дзорагет и Раздан (Занга), в связи с энергетическим их использованием. Поэтому в дополнение к существующим метеорологическим станциям весьма желательно открытие станции Чомча в верховье Дзорагет и перевод метеорологического поста Мисхана в бассейне Раздан в разряд станций.

Известно, что в развитии турбулентных и конвективных процессов важную роль играет приращение силы ветра с высотой. Это обстоятельство еще ярче выражено при условии сложной орографии местности.

На такой сильно пересеченной местности, как территория Армении, необходимо наличие густой сети шаропилотных наблюдений, особенно для наблюдений над ветром в слое 2—3 км над поверхностью земли. Наблюдения особо важно вести в юго-западном предгорье массива Арагац, в пункте Алагез—ж. д.

При западных и юго-западных вторжениях воздушных масс условия погоды на юго-западном склоне горы Арагац характерны для аналогичных склонов других горных хребтов Армении.

Для изучения ветра над бассейном озера Севан шаропилотные наблюдения следует организовать в районе Яных—Мартуни. Открытие этого пункта очень важно и для работы авиации.

На территории республики шаропилотные наблюдения ведутся с одного пункта. В основу метода таких наблюдений положено предположение о постоянстве вертикальной скорости самого шара. Между тем известно, что на скорость шара влияет ряд факторов, обуславливающих турбулентность атмосферы.

По этому вопросу интересную работу проделала М. В. Заварина [4]. Анализируя результаты шаропилотных наблюдений в Тбилиси, автор приходит к выводу, что в районах со сложным рельефом местности нельзя пользоваться однопунктными наблюдениями над ветром, так как получаются очень сомнительные данные о скорости и направлении ветра.

Наряду с вопросами рационального размещения станций необходимо обратить серьезное внимание на оснащение сети всеми необходимыми приборами.

Наблюдения за осадками при помощи дождемеров и за снежным покровом по снегомерной рейке не дают требуемой точности и детализации их распределения во времени и по территории. Пятидневные снегосъемки, проводимые опять-таки в районе станций, недостаточны для гидрометеорологических целей.

Для изучения распределения жидких осадков во времени, необходимого для разработки методики прогнозов, требуется развитие сети самописцев осадков. В условиях горного рельефа Армении,

при значительной роли осадков ливневого характера с большой вариацией интенсивности, потребность в самописцах значительно больше, чем в равнинных условиях Европейской территории Союза. Между тем в настоящее время насчитывается всего 3—4 действующих плювиографа, размещенных, к тому же, до известной степени случайно.

Установка дополнительных самописцев осадков требуется прежде всего на всех действующих и намечаемых к открытию высокогорных станциях.

При сгущении сети самописцев необходимо придерживаться принципа кустования пунктов. Наибольшего сгущения следует добиваться в северных районах—в бассейнах рек Дзоргет, Памбак и Актев (Актафинка) с ярко выраженным режимом летних паводков.

Самописцы должны быть установлены прежде всего в следующих пунктах:

- а) басс. р. р. Дебед и Актев—Калинино, Чомча, Гогаран, Базумский перевал, Спитак—поселок (Амамлу), Спитакский перевал, Лермонтово и Семеновка;
- б) басс. р. Раздан—Мисхана, Ерагагат и Гямрез;
- в) басс. р. Ахурян—Шурабад и Ленинан;
- г) склоны Арагаца—Апаран, Гарновит, В. Талин и Алагез—ж. д.;
- д) южные и юго-восточные районы—Джермук, Гумарчах, Сисиан, Горис, Арамазд и Личк;
- е) басс. оз. Севан—Яных, Мазра и гора Гинал.

В дополнение к сети метеорологических станций желательно также развертывание сети суммарных дождемеров в горных районах. Суммарные дождемеры должны быть запроектированы поперечными разрезами через основные горные хребты.

Опыт использования суммарных дождемеров в горах Средней Азии показал, что они вполне применимы до высоты 4000 м. По данным Узбекского УГМС, корреляция показаний суммарных дождемеров, установленных в районе Алайского и Заалайского хребтов в верхнем течении р. Вахш на высоте 3—4 тысяч м, с показаниями обычных дождемеров и со снегосъемками дала хорошие результаты.

Установку суммарных дождемеров желательно осуществить на следующих хребтах: Мокрые горы, Базумский, Памбакский, Гегамский, Варденисский, (Южно-Гокчинский) и Зангезурский (Конгур-Алангезский).

Пункты установки должны быть по возможности ближе к населенным пунктам и располагаться близ дорог и троп.

Наблюдения за уровнями и расходами рек

На малых реках горного типа уровень воды подвержен значительным колебаниям не только ото дня ко дню, но и в течение одних суток. Эти колебания в период весеннего половодья связаны

с неравномерным поступлением талых вод в течение суток, с одной стороны, и с образованием дождевых паводков, накладывающихся на волну половодья,—с другой.

Значительные колебания уровня под влиянием неравномерности снеготаяния отмечены, например, Б. Д. Зайковым на реках Севанского бассейна [5]. В летний период резкие колебания уровня воды связаны с дождевыми паводками.

В настоящее время среднесуточные расходы воды на всех реках Армении вычисляются по уровням трех, а иногда и двух сроков наблюдений по водомерной рейке. Для вычисления характерных и среднесуточных расходов в период половодья и летне-осенних паводков, а также для краткосрочных прогнозов расходов для гидроэлектростанций, трехсрочные наблюдения недостаточны. Водомерные наблюдатели не отмечают внезапных изменений уровня и часто вовсе пропускают значительные дождевые паводки, в результате чего гидрограф искажается и сток в целом несколько занижается.

Это происходит главным образом потому, что дождь начинается чаще всего к вечеру и пики паводков проходят между 20-часовым вечерним и 8-часовым утренним сроками наблюдений (интервал 12 часов).

Так, например, сравнение среднесуточных расходов, вычисленных по речным и по лимниграфическим уровням для р. Касах у с. Аштарак за лето 1937 г. показало, что ошибки вычислений по срочным уровням в отдельные дни достигают 30 и более процентов, а средняя ошибка для дней с паводками равна 17% от величины расхода.

Еще более показательными являются результаты сравнения максимальных расходов. Ошибка в этом случае иногда даже превышает величину вычисленного расхода.

В результате анализа более чем 120 паводков на реках Ахурян, Касах, Памбак, Дзорагет, Акстев, Гарни, Арпа и Воротан установлено, что средняя длительность подъема летних паводков равна от 6 до 15 часов, а наибольшая—не превосходит 18 часов. Для реки Касах, в частности, средняя продолжительность подъема уровня равна 9 часам (интервал от выпадения осадков до пика паводка, образованного обособленным дождем), а пределы колебания времени подъема—от 5 до 13 часов. Таким образом в течение 12 часов ночного интервала между наблюдениями может пройти преобладающая часть объема отдельных паводков и наблюдатель в 8 часов утра фиксирует уровень где-то на глубоком спаде.

Очевидно, что при таких условиях и на других реках Армении мы будем иметь ошибки вычисленных среднесуточных и максимальных расходов периода паводков, аналогичные приведенным выше для р. Касах.

Отсюда становится понятным, что при существующем состоянии наблюдений за уровнями разработка методов краткосрочных

прогнозов паводков или предупреждений о паводках практически невозможна. Это относится не только к эмпирическим методам, но и в особенности к генетическим, теоретическая основа которых в настоящее время уже достаточно разработана. Следовательно, при существующем состоянии наблюдений необходимые народному хозяйству прогнозы по таким рекам, как Дзорагет, Раздан и Ахурия, не могут быть даны с требуемой точностью.

Недостаточная точность вычисления среднесуточных расходов отражается также и на качестве информации заинтересованным ведомствам, ведущим учет суточного водопотребления, как, например, Арменэнерго. Поэтому наряду с развитием сети метеорологических наблюдений и установкой самописцев осадков необходимо оборудование гидрометрических створов в основных речных бассейнах также самописцами уровня воды.

Бесперебойная работа самописцев уровня должна быть обеспечена в первую очередь на основных створах в бассейне Раздан для изучения её режима в условиях искусственного регулирования.

К первоочередным работам следует отнести также установку самописцев на реках с хорошо выраженным дождевым питанием и на реках с весенним половодьем от снеготаяния—для выяснения суточного хода стока. К таковым относятся:

1. р. Гедар	пункт	с. Аван
2. р. Дзорагет	"	с. Н. р. Гергерки
3. р. Памбак	"	ст. Колагеран
4. р. Акстев	"	с. Иджеван
5. р. Ахурия	"	с. Капс
6. р. Мармарик (Маман)	"	с. Бужакан (Бабакиши)
7. р. Арпа	"	с. Микоян
8. р. Воротан	"	с. Борисовка
9. р. Вохчи (Охчи)	"	г. Кафан
10. р. Касах	"	с. Кечут
11. р. Дебед	"	ДзораГЭС

Наблюдения за селеобразованием

Селевые явления в различной степени имеют место в ряде районов Армении.

К наиболее значительным селевым бассейнам относятся: Ереванский куст, селав Мастара на западных склонах Арагаца, сели бассейна р. Памбак, Ленинанканское плато и склоны Зангезурского хребта (реки Мегри и Ордубад).

Наиболее важным районом с точки зрения народного хозяйства является Ереванский район. Именно здесь и целесообразно сосредоточить селевые наблюдения и исследования.

До самых последних лет Гедарский селевой бассейн был совершенно не освещен в гидрометеорологическом отношении. После

прохода катастрофического селя 25 мая 1946 г. очень трудно было дать удовлетворительную характеристику режима обусловивших его осадков и определить размеры самого паводка в руслах, так как в пределах бассейна не имелось ни метеорологических станций, ни гидрометрических постов. Все действовавшие до того момента метеостанции—Ереван, Гарни, Фонтан, Егвард и пост Куйли находятся за пределами бассейна и не могли быть непосредственно использованы в гидрологических расчетах. Единственный в бассейне гидрометрический пост, функционировавший ранее в черте г. Еревана, был закрыт еще в 1935 году.

Для организации селевых наблюдений в Ереванском районе необходимо форсировать осуществление стоковоселевой станции в бассейне Гедара с тем, чтобы уже в 1949 году закончить подготовительные работы, а с 1950 г. приступить к развертыванию станции.

Не останавливаясь подробно на программе работ этой станции, что может служить предметом отдельной статьи, отметим лишь основное направление мероприятий.

Стоково-селевая станция в бассейне реки Гедар должна предусматривать:

а) организацию 3—4 гидрометрических створов с детальными наблюдениями над жидким и твердым стоком оборудованных капитальными бетонными измерительными сооружениями;

б) организацию ливнемерного куста в бассейне Гедар—Джрвеж в составе 20 дождемерных пунктов, из которых около половины—саморегистрирующие;

в) создание службы предупреждений, для чего все пункты гидрологических и дождемерных наблюдений должны иметь прямую телефонную связь с центром в Ереване, а наиболее ответственные из них—оборудованы автоматическими радиоустановками.

При установке самописцев уровня (расходов) последние должны быть приурочены к уже существующим плотинам в руслах или к участкам с неразмываемым ложем. Там, где нет указанных условий, самописцы следует устанавливать только в комбинации с контрольными сечениями донного типа.

В первую очередь самописец должен быть установлен на недавно открытом посту на реке Гедар у с. Аван.

Наряду со специальными наблюдениями в селевых руслах совершенно необходима также постановка наблюдений за твердым стоком горных рек.

Если измерение расходов взвешенных наносов и отбор проб на мутность в настоящее время производится в достаточном количестве (всего в 17 гидрометрических створах), то учет донного влечения производится неудовлетворительно. Это происходит от того, что применяемый в двух пунктах—р. Кявар—с. Норадуз и р. Раздан—Гегамаван батометр системы Б. В. Полякова, даже в условиях сла-

бого донного влечения, не дает удовлетворительных результатов, а в условиях влечения крупных наносов и вовсе непригоден.

В настоящее время еще нет апробированной и признанной методики измерения влекомых наносов для горных рек и соответствующей признанной конструкции прибора. Поэтому в настоящее время мы не в состоянии удовлетворять запросы ряда отраслей народного хозяйства республики в отношении стока наносов, так как отсутствие количественной оценки донного влечения обесценивает и данные наблюдений за взвешенными наносами.

Между тем потребность в оценке твердого стока возрастает с каждым годом, особенно в связи с энергетическим использованием таких рек, как Раздан, Воротан, Дебед и др. Поэтому в программу исследований в области стока наносов в качестве первоочередной темы должна войти тема по разработке методики измерения стока влекомых наносов, причем в первую очередь должен быть испытан прибор ТНИСГЭИ сетчатого типа.

Наблюдения за ледовым режимом

Среди зимних ледовых явлений особое место, с точки зрения народно-хозяйственного значения, занимают явления шугообразования. Ленинканская, Канакерская и другие гидроэлектростанции ежегодно испытывают серьезные затруднения от шуги и нуждаются в соответствующих прогнозах.

Однако, в настоящее время еще нет достаточного объема наблюдений, необходимых для разработки методики прогноза шугообразования. Наблюдения, проводимые водомерными наблюдателями гидрометеорологической службы, не только не содержат сведений о времени появления и исчезновения шуги и о её количестве, но подчас не отмечают и самый факт наличия шуги.

Учитывая отсутствие проверенной методики и инструментария наблюдений за шугой, а также невозможность массового применения шугомеров, наблюдения в системе гидрометслужбы в настоящее время должны носить массовый визуальный характер.

Наблюдатели на всех без исключения постах должны отмечать не только наличие шуги, но и её количество в баллах (в процентах покрытия зеркала реки), а также начало и конец шугоходов. Такие наблюдения в основном должны проводиться в обычные сроки водомерных наблюдений и лишь в дни с интенсивным образованием шуги потребуются дополнительный осмотр реки через 1—2 часа. Учитывая, что такого рода наблюдения не потребуют ни дополнительного оборудования, ни дополнительных затрат, они могут быть осуществлены уже в ближайшее время.

Кроме шуги должны отмечаться также и другие ледовые явления: забереги, ледоход, ледостав, полыньи, наледи, закраины. В совокупности с данными о шугообразовании указанные сведения поз-

волят полнее характеризовать зимний режим рек. К настоящему времени Водно-Энергетическим Институтом АН Арм. ССР выполнена большая работа по обобщению имевшихся наблюдений за ледообразованием на реках Армении, которая позволяет наметить наиболее рациональные пути дальнейших исследований [5]. На основе этого исследования и может быть выработана инструкция визуальных наблюдений за ледообразованием, учитывающая специфику рек Армении.

Кроме указанных визуальных наблюдений, весьма желательно также измерение расхода шуги при помощи шугомеров конструкции ТНИСГЭИ.

Такие наблюдения в первую очередь целесообразно организовать на реках: Ахурян у с. Капс, Мармарик у с. Бужакан и Воротан, в верхнем течении.

Изучение испарения

Изучение испарения с естественных поверхностей является в методологическом отношении одной из наиболее трудных задач гидрометеорологических исследований, не разрешенных в должной мере до настоящего времени.

Между тем целый ряд народно-хозяйственных проблем, как-то учет потерь воды из искусственных водохранилищ, уточнение водного баланса озера Севан и ряд других требуют знания величин годового испарения как с водной поверхности, так и с суши, и, следовательно, нуждаются в постановке соответствующих исследований.

Изучение испарения с водной поверхности в условиях горного рельефа Армении необходимо проводить в разных высотных зонах. Для этого Армянское управление Гидрометслужбы, в соответствии с пожеланием Водно-Энергетического Института АН Арм. ССР и Государственного Гидрологического Института, приступило к организации трех испарительных станций в следующих пунктах: г. Ереван, высота около 910 м, на острове Севан, высота около 1918 м и на высокогорной станции Арагац (Алагез), на высоте 3230 м над уровнем моря.

Станции должны быть оборудованы испарительными бассейнами площадью в 20 м² и глубиной 1,5 м.

Кроме того необходима организация пловучей метеорологической станции на оз. Севан для изучения метеорологических условий, в том числе и испарения на открытой поверхности озера.

Что касается наблюдений за испарением с поверхности почвы, то до настоящего времени нет удовлетворительных приборов, которые можно было бы рекомендовать для сети станций УГМС.

В результате специального обследования комиссия ГГИ в 1945 году забраковала все существующие почвенные испарители, как непригодные для массовых наблюдений.

Поэтому организацию таких наблюдений впредь до разработки и апробирования надежных приборов следует признать нецелесообразной.

Наблюдения за режимом родников

Основная цель изучения режима родников и, в частности, их дебита состоит в выявлении возможностей водоснабжения существующих и планируемых населенных пунктов, а также в уточнении водности отдельных рек.

Наряду с этим знание дебита наиболее крупных родников со-служит ценную службу при расчете водных ресурсов рек Армении и при построении карт многолетних характеристик речного стока.

На территории Армении зарегистрировано свыше 12000 родников. Из указанного числа только около 5% имеют дебит свыше 10 л/сек. Родников с дебитом свыше 500 л/сек. насчитывается около двух десятков.

Организацию стационарных гидрометрических наблюдений считаем необходимым лишь на наиболее крупных родниках, имеющих большое народно-хозяйственное значение. Таковые можно разбить на две группы. К первой относятся родники, используемые или намечаемые к использованию для водоснабжения крупных объектов республики. К числу их относятся: Крхбулагские (Котайкский район), частично используемые в настоящее время для водоснабжения Еревана, Гюмушские, Арзаканские и Рндамал—Карвансарайские (Ахтинский район), являющиеся резервным источником водоснабжения Еревана и его промышленных предприятий.

Ко второй группе относятся новые источники в бассейне оз. Севан, открывшиеся в результате снижения уровня озера. К числу их относятся: родник „Аслан-Каплан“, расположенный к северо-западу от с. Норадуз, родник „Нор-Гельский“—к северо-востоку от с. Цак кар, родник „Бхбхкан“, расположенный между селениями Личк и Неркин Геташен, родник „Цовинарский (Колакранский)“ к западу от с. Н. Алучалу и родник „Н. Гедакбулагский“—между селениями Карчахпюр и Цовак.

Наблюдения за колебанием дебита и химизмом этих родников представляют значительный интерес с точки зрения изучения явлений, связанных со спуском озера Севан вообще и в частности—для уточнения водного баланса озера.

На остальных родниках Армении с дебитом свыше 50 л/сек. весьма желательно производство эпизодических замеров, которые позволили бы не только оценить их среднюю мощность, но и пределы колебаний внутри года.

В ы в о д ы

В результате тщательного изучения материалов гидрометеорологических наблюдений и размещения сети самих станций установлено, что дальнейшее их развитие должно пойти по пути докомплектования станций недостающими приборами и улучшения качества наблюдений. В первую очередь должна быть развита сеть самописцев для регистрации осадков и уровня воды на реках.

Наряду с этим, существенно необходимым является расширение сети высокогорных метеорологических станций, которые в совокупности с существующей, преимущественно предгорной, сетью позволят решить основные задачи, выдвигаемые народным хозяйством Армении, с удовлетворительной полнотой и точностью.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 9 V 1949.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. П. Курская—К вопросу о рациональном размещении метеорологической сети станций III разряда. Тр. ГГО, вып. 4, 1947.
2. Г. Л. Гакен—К вопросу о рациональном размещении станций для учета гроз. Тр. ГГО, вып. 4, 1947.
3. Е. И. Абрамова и О. А. Дроздов.—Рациональные расстояния между станциями сети, ведущими учет высоты снежного покрова. Тр. ГГО, вып. 4, 1947.
4. М. В. Заварина—О точности измерения ветра методом шаропилотных наблюдений с одного пункта. Тр. ГГО, вып. 4, 1948.
5. Б. Д. Зайков—Материалы по исследованию оз. Севан и его бассейна, ч. I, вып. 3, 1933.
6. С. Я. Вартазаров.—Ледовый режим рек Армении. Изв. АН Арм. ССР (естеств. науки), № 8, 1946.
7. С. Я. Вартазаров.—Методы количественного учета шуги. Метеорология и Гидрология, № 9, 1939.

Ա. Ն. Վաժնով, Գ. Օ. Կիրիշյան

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՏԵՐԻՏՈՐԻԱՅԻ ՎՐԱ ՀԻՊՐՈՄԵՏԵՈՐՈՂՈԳԻԱԿԱՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ
ՑԱՆՑԻ ԵՎ ԴԻՏՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՌԱՑԻՈՆԱԼԱՑՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ**

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հայաստանի ժողովրդական տնտեսությունը յուրաքանչյուր տարի ափսոսելի ու ափսոսելի մեծ պահանջներ է առաջադրում սննդամթերքի հիդրոմետեորոլոգիական ծառայությանը:

Հիդրոմետեորոլոգիական ուսումնասիրությունն անհրաժեշտ է լինում կատարել ոչ միայն շրջանների և ջրային մեծ օբյեկտների համար ամբողջովին վերցրած, այլ և փոքր տերիտորիաների և շատ փոքր ջրավազան-

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

В. П. Мартынов

Энергетический показатель для анализа эффективности водно-силового режима гидроэлектрической станции и гидроэнергосистемы.*

К концу четвертой пятилетки участие гидроэлектрических станций в электробалансе Союза значительно возрастет и достигнет 14%. Уровень же водноэнергетического хозяйства гидроэлектроцентралей (ГЭС) и эффективность использования водных ресурсов не находятся еще на должной высоте и должны быть подняты [1]. В связи с этим возникает вопрос: какой энергетический показатель должен быть положен в основу, как критерий, для анализа эффективности совместно работающих ГЭС?

Для целей научного исследования и для решения практических задач при эксплуатации и проектировании гидроэлектрических станций нужно иметь такой энергетический показатель, который позволял бы:

1. характеризовать и удобно сравнивать между собою различные ГЭС (имеющие различного типа сооружения, оборудование и параметры водотока) по эффективности использования водотока;
2. характеризовать и удобно сравнивать между собою гидроэнергосистемы по эффективности режима работы всех ГЭС системы в целом;
3. нормировать эффективность работы ГЭС различных параметров и имеющих различное назначение в энергосистеме, а также нормировать эффективность работы энергосистемы;
4. удобно анализировать энергобаланс гидростанции для возможности выявления источников нерационального режима (потерь выработки).

Существующие энергетические показатели не отвечают полностью поставленным требованиям. В процессе научно-исследовательской разработки вопроса рационализации водно-энергетического режима энергосистемы при наличии суточного регулирования был предложен и обоснован энергетический показатель, отличающийся от существующих и в достаточной мере отвечающий требованиям, поставленным выше перед подобным показателем.

* Доложено на Ученом Совете ВЭИ АН Арм ССР, 16 XII 1948 г.

Существующие показатели энергетического режима гидростанции

Абсолютные показатели экономичности не позволяют сопоставлять экономичности как различных элементов оборудования и сооружений, так и гидростанции в целом. Для оценки экономичности работы оборудования и гидростанции, а также для сопоставления показателей отдельных ГЭС пользуются удельными показателями экономичности: удельный расход, коэффициент полезного действия, удельная потеря, отнесенная к полезной мощности и удельная потеря, отнесенная к подведенной мощности [2].

Применительно к гидростанциям на практике употребляются первые два показателя: удельный расход, выраженный в $\text{м}^3/\text{сек-квт}$ или $\text{м}^3/\text{квтч}$, и КПД (η).

Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей (ПТЭС) устанавливают следующие технико-экономические показатели для гидростанций [3]: выработка электроэнергии за отчетный период (суммарно), удельный расход воды на выработанный станцией киловаттчас, расход электроэнергии на собственные нужды станции (§ 1193).

Для тепловых электростанций ПТЭС предписывают учитывать также удельный расход условного топлива на выработанный станцией киловаттчас (§ 1191).

Удельный расход условного топлива на выработанный киловаттчас является весьма удобным энергетическим показателем экономичности тепловой электростанции. Он позволяет наглядно сравнивать между собой экономичность работы отдельных электростанций и энергосистем и нормировать их работу (с учетом топливной политики и др.).

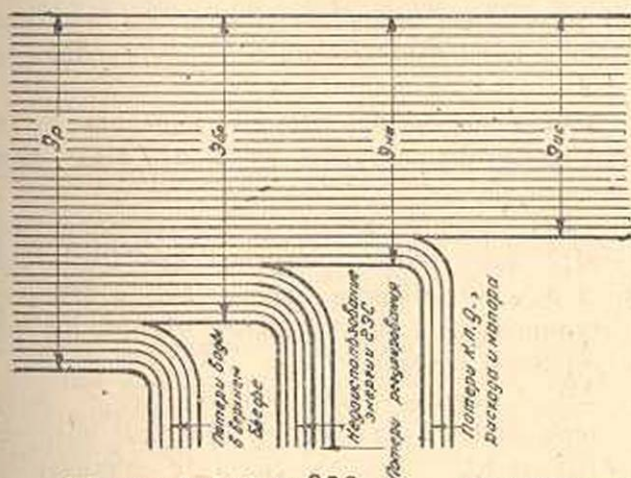
Несмотря на наличие подробных форм планирования и учета эксплуатации ГЭС, показатель для гидростанции, подобный расходу условного топлива, отсутствует. Указываемые в „отчете гидроэлектростанции о выполнении плана по производству“ (Форма Э-4-РГ) значения КПД станции в целом и удельных расходов воды брутто не отвечают приведенной выше цели. Так, например, КПД гидростанции в целом принимается, как отношение выработки электроэнергии за отчетный месяц в квтч, умноженное на 100, к теоретически возможной выработке электроэнергии за тот же период, при фактических расходах воды по водотоку станции в целом. При этом „методика подсчета теоретически возможной выработки для определения указанных КПД для каждой станции устанавливается самими станциями и Районными Управлениями (по согласованию с Главком)“. [4].

Удельные расходы воды, вычисляемые для ГЭС, позволяют сравнивать эффективность работы отдельной гидростанции по сезонам или годам, но не могут служить для сравнения между собой

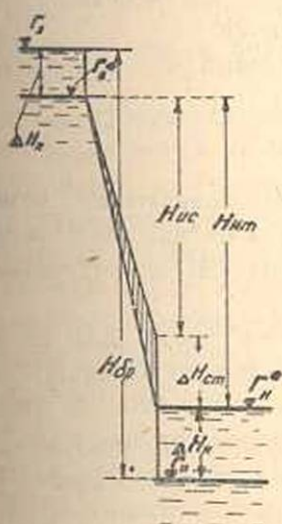
эффективности работы различных ГЭС, имеющих различные напоры и разное назначение в энергосистеме.

Для отдельных ГЭС Министерство Электростанций СССР нормирует удельные расходы воды (брутто) на выработанный киловатт-час.

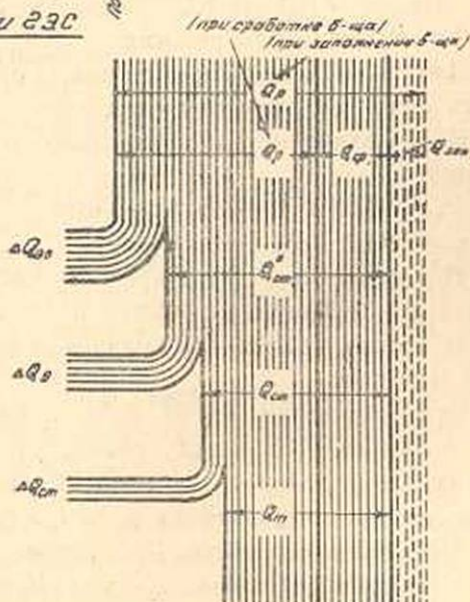
Стройная система показателей эксплуатации гидроэлектростанции предложена профессором-доктором тех. наук Т. Л. Золотаревым [5]. Исходя из данных баланса энергии ГЭС (см. рис. 1), Т. Л. Золотарев выводит следующие показатели эксплуатации ГЭС:



1. Баланс энергии ГЭС



2. Баланс напоров



3. Баланс расходов

Рис. 1. Баланс напоров, расходов и энергии гзс.

$$а) \text{ показатель использования реки: } \varphi = \frac{\Delta \mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_p} = \frac{Q_{ст}^0}{Q_p}, \quad 1.$$

$$б) \text{ показатель использования энергии ГЭС: } \chi = \frac{\Delta \mathcal{E}_{нт}}{\mathcal{E}_{бр}} = \frac{Q_{ст} \cdot H_{нт}}{Q_{ст}^0 \cdot H_{нт}^0}, \quad 2.$$

$$в) \text{ показатель качества эксплуатации: } \psi = \frac{\Delta \mathcal{E}_{ис}}{\Delta \mathcal{E}_{нт}} = \frac{Q_{ст} \cdot H_{ис} \cdot \eta_{ст}}{Q_{ст} \cdot H_{нт} \cdot \eta_{ст}^0}, \quad 3.$$

$$г) \text{ сводный показатель использования водотока } \varepsilon = \varphi \cdot \chi \cdot \psi = \frac{\Delta \mathcal{E}_{ис}}{\mathcal{E}_p} = \frac{Q_{ст} \cdot H_{ис} \cdot \eta_{ст}}{Q_p \cdot H_{нт}^0 \cdot \eta_{ст}^0}, \quad 4.$$

где $\mathcal{E}_p$ — энергия реки за рассматриваемый промежуток времени, т. е. предельно возможная выработка, если бы при максимально возможном напоре и КПД был пропущен через турбины весь сток реки.

$\Delta \mathcal{E}_p = \mathcal{E}_p - \Delta \mathcal{E}_{вб}$ — энергия брутто, т. е. предельное количество энергии, которое могло бы поступить на ГЭС. $\Delta \mathcal{E}_{вб}$ — потери верхнего бьефа.

$\Delta \mathcal{E}_{нт} = \Delta \mathcal{E}_p - \Delta \mathcal{E}_x$ — энергия нетто, т. е. количество энергии, поступившей на ГЭС. $\Delta \mathcal{E}_x$ — потери энергии для ГЭС, создаваемые потерями расхода ΔQ_0 и потерями напора ΔH_v и ΔH_n , вследствие проводимого регулирования и фактического отклонения режима работы от диспетчерского графика.

$\Delta \mathcal{E}_{ис} = \Delta \mathcal{E}_{нт} - \Delta \mathcal{E}_{ст}$ — используемая энергия, т. е. выработанная ГЭС. $\Delta \mathcal{E}_{ст}$ — потери энергии на ГЭС, создаваемые потерями расхода $\Delta Q_{ст}$, напора $\Delta H_{ст}$ и КПД $\Delta \eta_{ст}$, в связи с отклонением работы ГЭС от оптимального режима.

Для вычисления перечисленных показателей необходимо установить для ГЭС значения следующих величин:

$H_{нт}^0$ — напор нетто, предельно возможный по диспетчерскому графику;

$\eta_{ст}^0$ — КПД ГЭС — оптимальный;

$\eta_{ст}$ — КПД ГЭС — фактический.

Предложенная Золотаревым система показателей позволяет достаточно дифференцированно подходить к оценке качества работы ГЭС и весьма удобна для сравнения работы ГЭС по отдельным сезонам и годам.

Эти показатели могут быть применены также для сравнения работы разных ГЭС между собой, хотя в условиях эксплуатационной практики определение значений $H_{нт}^0$ и $\eta_{ст}^0$ может быть в известной мере условным. Показатели φ , χ и ψ представляют собою по существу КПД трех элементов ГЭС: водозабора, деривации и машинного зала. Сводный показатель ε представляет собою полный КПД ГЭС. Золотарев дает пример вычисления и значения этих показателей для некоторых гидроэлектростанций [6].

Следует отметить, что показатель φ в нормальных условиях эксплуатации в весьма малой степени отражает качество работы

эксплуатационного персонала ГЭС и системы. Показатель χ характеризует главным образом работу диспетчерского персонала, но на него влияет также и эксплуатационный персонал ГЭС. Показатель ϕ отражает главным образом работу персонала ГЭС, но на него влияет также работа диспетчерского управления системы. Таким образом, строгое выделение влияния отдельных факторов эксплуатации в этих показателях не находит отражения. Являясь удобными показателями для укрупненного анализа эффективности работы ГЭС, описанные показатели не отвечают полностью требованиям, изложенным выше.

Весьма близким по смыслу к последним двум показателям является предложенный инж. И. М. Соколовым показатель эффективности режима эксплуатации ГЭС, так называемый „коэффициент эксплуатации ГЭС“ [7]

$$K_{\text{экс}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ф}}}{\mathcal{E}_{\text{воз}}} \geq 1 \quad 5$$

где: $\mathcal{E}_{\text{ф}}$ — фактическая выработка ГЭС;

$\mathcal{E}_{\text{воз}}$ — возможная выработка ГЭС.

Для вычисления $\mathcal{E}_{\text{воз}}$ вводятся „нормальные“ потери воды, „нормальные“ потери напора и „нормальный“ КПД агрегата, устанавливаемые для данной, конкретной ГЭС.

Критерием нормального использования сооружений, оборудования и притока воды к гидроэлектростанции должен служить по Соколову показатель $K_{\text{экс}} = 1$. Мероприятиями по снижению потерь воды и напоров и повышению КПД гидроагрегатов величина этого показателя может быть повышена, т. е. возможно значение $K_{\text{экс}} > 1$. При небрежном ведении эксплуатации $K_{\text{экс}} < 1$.

Инж. Г. Г. Горбунов считает $K_{\text{экс}}$ наиболее объективным показателем работы гидроэлектростанции и предлагает ввести его в формулу Э-4—РГ [8].

$K_{\text{экс}}$ удобен для сравнения работы отдельной ГЭС по сезонам или по годам, но он не позволяет охарактеризовать роль, которую играет станция в системе (регулирующая, базисная, пиковая) и объективно сравнить между собою отдельные (разные) ГЭС, а также провести сравнение по качеству водно-энергетического режима между гидроэнергосистемами.

Введение „нормальных“ N , Q и η , устанавливаемых для каждой конкретной ГЭС, вносит значительную условность, аналогично значению КПД, определяемому в форме Э-4—РГ.

Условия высокоэффективного режима гидроэлектростанции и гидроэнергосистемы. Обоснование рационального энергетического показателя режима

Требованием высокоэффективного режима работы гидроэлектрических станций, работающих в системе, является обеспечение наибольшей полезной выработки системы при пропуске через стан-

ции всей воды в пределах пропускной способности дериваций ГЭС и выполнении требований суточного регулирования, требований других водопользователей и т. п. При этом для отдельных ГЭС режим может быть и не оптимальным при данном расходе воды, но обеспечивающим более экономичный режим всей гидроэнергосистемы, т. е. наибольшую полезную выработку всей системы (например, при суточном регулировании). Предполагаем, для упрощения, что максимуму выработки системы соответствует максимум полезной выработки.

Условие оптимального режима при заданных параметрах ГЭС гидроэнергосистемы и заданной величине стока может быть написано в следующем виде:

$$\mathcal{E}_{\text{сист}} = \mathcal{E}_{\text{ст}1} + \mathcal{E}_{\text{ст}2} + \dots = \sum_i^n \mathcal{E}_{\text{ст},i} = \text{максимум.} \quad 6$$

Здесь выработка отдельной ГЭС на шинах станции выражается формулой:

$$\mathcal{E}_{\text{ст}, n} = N_{\text{ст}} \cdot t = \frac{\gamma Q_{\text{ст}} \cdot H_{\text{бр},n} \cdot \eta_n \cdot t}{75.1, 36.3600} = \frac{W_n \cdot H_{\text{бр},n} \cdot \eta_n}{367} \quad \text{кВтч} \quad 7$$

где: W_n — сток воды в м^3 , могущий быть использованным на ГЭС, т. е. та часть стока реки, которая может поступить в деривацию ГЭС (определяется пропускной способностью деривации); $H_{\text{бр},n}$ — напор брутто ГЭС полный — расчетный (проектный) в метрах;

$\eta_n = \eta_{\text{расх}} \cdot \eta_{\text{нап}} \cdot \eta_{\text{турб}} \cdot \eta_{\text{ген}}$ — полный КПД станции (фактический);

$\eta_{\text{расх}}$ — КПД деривации ГЭС по расходу (использование расхода);

$\eta_{\text{нап}}$ — КПД деривации ГЭС и напорных трубопроводов по напору (использование напора);

$\eta_{\text{турб}}$ — КПД турбин ГЭС;

$\eta_{\text{ген}}$ — КПД генераторов ГЭС;

$\gamma = 100 \text{ кг/м}^3$;

$Q_{\text{ст}}$ — расход воды, могущий поступить на ГЭС, в $\text{м}^3/\text{сек}$; t — рассматриваемый промежуток времени в сек.

Для отдельной ГЭС выражение 7 может быть написано в следующем виде:

$$q'_{\text{ст}} = \frac{W_n \cdot H_{\text{бр},n}}{\mathcal{E}_{\text{ст},n}} = \frac{367}{\eta_n} \quad 8.$$

При рассмотрении отдельно взятой ГЭС, из выражения 8 вытекает, что максимуму выработки станции соответствует максимальное значение КПД η_n , то есть минимум величины $q'_{\text{ст}}$.

Таким образом условие высокоэффективного энергетического режима работы отдельной ГЭС (вне увязки с системой) может быть написано в следующем виде:

$$q'_{\text{ст}} = \text{минимум.} \quad 9.$$

Величина $q'_{\text{ст}}$ представляет собою отношение подведенной к станции энергии ($W_n \cdot H_{\text{бр},n}$), выраженной в килограммометрах, к по-

лезной энергии, полученной на шинах станции ($\mathcal{E}_{ст}$), выраженной в киловатт-часах, то-есть величина $q'_{ст}$ представляет собою *удельный расход* (безразмерная величина), являющийся величиной, обратной КПД ($d = \frac{1}{\eta}$).

Итак, $q'_{ст}$ представляет собою число килограмметров подведенной энергии водотока к станции, приходящихся на один киловатт-час полезной энергии, выработанной станцией на ее шинах.

Для удобства практического использования этого показателя мы полагаем, что все сравниваемые по режиму ГЭС имеют напор в один метр, но подведенная энергия водотока и выработанная энергия станцией не меняются. Тогда, очевидно, величина стока, прошедшего через станцию, должна быть увеличена в N раз, то-есть через ГЭС должно пройти $W_n \cdot H_{бр,n} M^3$ воды, что при напоре в один метр даст ту же самую энергию водотока. Следовательно, величину $q'_{ст}$ можно трактовать, как *условный удельный расход воды* брутто станции ($M^3/квтч$), если бы ГЭС имела напор один метр и выработала то же количество энергии $\mathcal{E}_{ст,n}$ (квтч), пропустив через себя сток воды $W_n \cdot H_{бр,n} (M^3)$. Назовем этот условный удельный расход при приведении станции к одному метру напора *удельным единичным расходом воды гидростанции*.

Полагая в формуле 8 значение $\eta_n = 1$, получим теоретический (идеальный) предел величины удельного единичного расхода воды:

$$q'_{ид} = 367 M^3/квтч \text{ при } 1 \text{ м напора на станции} \quad . \quad . \quad . \quad 10$$

Практически достижимое минимальное значение удельного единичного расхода воды в настоящее время может составить в предположении максимальных возможных КПД

$$\eta_{гидротех.} = 0,97; \quad \eta_{турб} = 0,93; \quad \eta_{ген} = 0,97;$$

$$q'_{мин} = \frac{367}{0,97 \cdot 0,93 \cdot 0,97} = 420 M^3/квтч \text{ при } 1 \text{ м напора на ГЭС} \quad . \quad . \quad 11$$

Для гидроэнергосистемы выражение выработки может быть записано в следующем виде:

$$\mathcal{E}_{сист} = \frac{W_1 \cdot H_{бр1} \cdot \eta_1}{367} + \frac{W_2 \cdot H_{бр2} \cdot \eta_2}{367} + \dots = \frac{1}{367} \sum_1^n W_n \cdot H_{бр,n} \eta_n \text{ квтч.} \quad 12.$$

Здесь КПД отдельных ГЭС (η_n), как правило, различны и не могут быть вынесены за знак суммы.

Результирующий КПД гидроэнергосистемы или *условной станции*, заменяющей все ГЭС системы, можно найти как отношение полезной, выработанной энергии всеми ГЭС системы, к подведенной энергии водотоков ко всем ГЭС, то-есть:

$$\eta_{\text{сист}} = \frac{\frac{\partial_{\text{ст}1}}{W_1 H_{\text{бр}1}} + \frac{\partial_{\text{ст}2}}{W_2 H_{\text{бр}2}} + \dots}{\frac{1}{367} \sum_1^n W_n H_{\text{бр} \cdot n}} = 367 \frac{\partial_{\text{сист}}}{\sum_1^n W_n H_{\text{бр} \cdot n}}$$

$$\text{Отсюда } \partial_{\text{сист}} = \frac{\sum_1^n W_n \cdot H_{\text{бр} \cdot n}}{367} \cdot \eta_{\text{сист}} \text{ кВтч.} \quad 13,$$

где $\eta_{\text{сист}}$ — результирующий КПД всех станций системы, то-есть использование расхода и напора стока всех рек, в пределах пропускной способности ГЭС;

W_n — вся поступившая на станцию вода в m^3 за данный промежуток времени, в пределах пропускной способности деривации, за вычетом воды, отпущенной другим водопользователям (например, ирригация). Утечки и сбросы на плотине в размерах, дополняющих фактически поступающий расход в деривацию ГЭС до пропускной способности деривации, подлежат учету.

Выражение 13 может быть написано в следующем виде:

$$q_{\text{сист}} = \frac{\sum_1^n W_n \cdot H_{\text{бр} \cdot n}}{\partial_{\text{сист}}} = \frac{367}{\eta_{\text{сист}}} \quad 14$$

Это выражение аналогично формуле 8 для отдельной гидростанции и может быть названо также *удельным единичным расходом воды гидроэнергосистемы*.

Приводя, как указывалось выше, все ГЭС системы к одному метру напора, при неизменной выработке и подведенной энергии, получим, что условный сток, прошедший через все станции системы (или условную станцию, заменяющую все ГЭС системы), равен

$$W_{\text{сист}} = W_1 H_{\text{бр}1} + W_2 H_{\text{бр}2} + \dots = \sum^n W_n \cdot H_{\text{бр} \cdot n} m^3$$

Таким образом, величину $q_{\text{сист}}$ можно трактовать, как условный удельный расход воды в энергосистеме при приведении всех станций системы к одному метру напора (в $m^3/\text{кВтч}$).

При рассмотрении гидроэнергетической системы в целом из выражения 14 вытекает, что максимуму выработки энергосистемы соответствует максимальное значение результирующего КПД $\eta_{\text{сист}}$ всех станций системы, то-есть минимум величины $q_{\text{сист}}$.

Условие рационального энергетического режима работы гидроэнергетической системы может быть записано в следующем виде:

$$q_{\text{сист}} = \text{минимум} \quad 15$$

Максимальное значение результирующего КПД всех ГЭС системы $\eta_{\text{сист}}$ может не соответствовать максимуму КПД η_n отдельных гидростанций (например, при наличии суточного регулирования). Поэтому условие, выражаемое формулой 15, может быть определено

путем сравнения отдельных вариантов режима работы ГЭС в энергосистеме (или графическим приемом).

Нами получен показатель водно-энергетического режима гидроэлектрической станции и гидроэнергетической системы при заданных параметрах станции и системы, который полностью характеризует эффективность (экономичность) их режима и позволяет наглядно и объективно сравнивать между собою по экономичности как отдельные ГЭС, так и гидроэнергосистемы и может служить удобным нормативом их энергетической эффективности.

Подобно расходу условного топлива на выработанный киловатт-час электроэнергии на теплоэлектростанциях, здесь применен расход *условного стока* на выработанный киловатт-час электроэнергии, т. е. стока, приведенного для всех ГЭС к одному метру напора.

Этот показатель эффективности предложен автором на основании анализа опыта эксплуатации гидроэнергосистемы Армянской ССР.

На основе ценных работ Золотарева по анализу показателей работы ГЭС, автором выполнен также анализ предложенного показателя.

Вычисление удельного единичного расхода воды весьма просто, сравнение же величин единичных расходов носит наглядный характер, подобно расходу условного топлива на квтч на тепловых ЦЭС.

Соответствующий анализ этого показателя позволит выявлять и нормировать различные виды потерь воды и напора (выработки).

Предложенный энергетический показатель в достаточной мере отвечает требованиям, поставленным выше перед подобным показателем.

Анализ энергобаланса гидростанции

На рис. 1 фиг. 2 и 3 приведен баланс напоров и расходов воды гидроэлектростанции [5].

Баланс напоров может быть записан в следующем виде:

$$H_{\text{ср}} = H_{\text{в}} - H_{\text{н}} = H_{\text{ис}} + \Delta H_{\text{ст}} + \Delta H_{\text{в}} + \Delta H_{\text{н}} \text{ м} \quad . \quad . \quad . \quad 16,$$

где: $H_{\text{в}}$ и $H_{\text{н}}$ — горизонты верхнего и нижнего бьефов;

$H_{\text{ис}} = H_{\text{нт}} - \Delta H_{\text{ст}}$ — используемый напор (показания манометров у турбин с учетом скоростного напора);

$H_{\text{нт}} = H_{\text{в}}^0 - H_{\text{н}}^0$ — напор нетто (с учетом потерь напора в верхнем бьефе в результате сработки водохранилища и сезонных колебаний, а также с учетом подпора в нижнем бьефе;

$\Delta H_{\text{ст}}$ — потери напора в сооружениях станции;

$\Delta H_{\text{в}} = H_{\text{в}} - H_{\text{в}}^0$ — потери напора в верхнем бьефе;

$\Delta H_{\text{н}} = H_{\text{н}}^0 - H_{\text{н}}$ — потери напора в нижнем бьефе.

Баланс расходов (стоков) при установившемся движении будет:

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{т}} + \Delta Q_{\text{ст}} + \Delta Q_{\text{в}} + \Delta Q_{\text{н}} \pm Q_{\text{п}} \text{ м}^3/\text{сек} \quad . \quad . \quad . \quad 17,$$

где: Q_p — бытовой сток реки;

$Q_t = Q_{ct} - \Delta Q_{ct}$ — фактический сток через турбины ГЭС;

Q_{ct} — фактический сток, поступивший на ГЭС;

ΔQ_{ct} — потери стока в сооружениях и оборудовании ГЭС;

ΔQ_d — потери стока в виде дополнительного сброса от его недоиспользования или неправильного регулирования (диспетчерские потери);

$\Delta Q_{вб}$ — потери верхнего бьефа (фильтрация, сброс и т. д.);

$Q_{в}$ — расход водохранилища (например, бассейна суточного регулирования).

Удельный единичный расход воды q_{ct} , как интегральный показатель, может быть разложен на составляющие, зависящие от различных факторов:

а) Составляющая удельного единичного расхода от потерь напора брутто (недоиспользование напора).

$$\Delta q_{ct, \text{нап}} = \frac{W_t (H_{бр} - H_{ис})}{\Delta q_{ct}} = \frac{W_t (\Delta H_a + \Delta H_n + \Delta H_{ct})}{\Delta q_{ct}} \quad . \quad . \quad . \quad 18$$

$\text{м}^3/\text{квтч}$ при 1 м напора на ГЭС,

где W_t — фактический сток, прошедший через турбины ГЭС;

Величина $\frac{W_t}{\Delta q_{ct}} = q_{нет} \text{ м}^3/\text{квтч}$ представляет собою фактический удельный расход нетто машинного зала (при фактических напорах); поэтому:

$$\Delta q_{ct, \text{нап}} = q_{нет} (H_{бр} - H_{ис}) = q_{нет} (\Delta H_a + \Delta H_n + \Delta H_{ct}) \quad . \quad . \quad . \quad 19$$

$\text{м}^3/\text{квтч}$ при 1 м напора на ГЭС.

Для энергосистемы

$$\begin{aligned} \Delta q_{сист, \text{нап}} &= \frac{W_{t1} (H_{бр1} - H_{ис1}) + W_{t2} (H_{бр2} - H_{ис2}) + \dots}{\Delta q_{ct1} + \Delta q_{ct2} + \dots} = \\ &= \frac{\sum_1^n W_{t, n} (H_{бр} - H_{ис})_n}{\sum_1^n \Delta q_{ct, n}} \text{ м}^3/\text{квтч при 1 м} \quad . \quad . \quad . \quad 20 \end{aligned}$$

б) Составляющая удельного единичного расхода от потерь расхода (недоиспользование расхода):

$$\Delta q_{ct, \text{расх}} = \frac{(W_{ct} - W_t) H_{бр}}{\Delta q_{ct}} = \frac{(\Delta W_{соор} + \Delta W_{сброс}) H_{бр}}{\Delta q_{ct}} \quad . \quad . \quad . \quad 21$$

$\text{м}^3/\text{квтч}$ при 1 м,

где

$\Delta W_{соор}$ — полные потери стока в сооружениях и оборудовании ГЭС.

$\Delta W_{сброс}$ — диспетчерские потери стока и сбросы из-за простоя оборудования.

простая необходимых по режиму агрегатов, прокрутка, сушка, испытание агрегатов и др.

4. *Режимные потери*: снижение КПД агрегата из-за невыгодного режима; работа агрегата с недогрузкой или перегрузкой и др.

Все главнейшие виды потерь (недовыработка ГЭС) могут быть легко определены обычными замерами, применяемыми при эксплуатации ГЭС. Ниже приводится примерная схема определения отдельных видов потерь, применительно главным образом для высоконапорной деривационной гидроэлектростанции с безнапорной деривацией и БСР.

Потери напора.

Составляющая удельного единичного расхода от полных потерь напора

$$\Delta q_{\text{ст. нап}} = \frac{W_T (H_{\text{бр}} - H_{\text{ис}})}{\Sigma \epsilon_{\text{ст}}} = \frac{W_T (\Delta H_{\text{н}} + \Delta H_{\text{л}} + \Delta H_{\text{ст}})}{\Sigma \epsilon_{\text{ст}}} = q_{\text{нет}} (H_{\text{бр}} - H_{\text{ис}})$$

W_T — определяется в м^3 по расходомерам (водомерам) на турбинах за данный промежуток времени (сутки).

$\epsilon_{\text{ст}}$ — определяется в кВтч по счетчикам на всех генераторах ГЭС.

$H_{\text{бр}} = \Gamma_{\text{в}} - \Gamma_{\text{н}}$ — известно на станции и вычисляется как разность нормальных (расчетных) горизонтов верхнего и нижнего бьефов.

$H_{\text{ис}}$ — определяется по манометрам на гидротурбинах с учетом скоростного напора.

При переменном режиме напоров и нагрузок, например, при суточном регулировании, $H_{\text{ис}}$ определяется за сутки как средневзвешенное значение для каждой турбины

$$H_{\text{ис}} = \frac{H_{\text{ис}1} \cdot N_1 \cdot t_1 + H_{\text{ис}2} \cdot N_2 \cdot t_2 + \dots}{N_1 t_1 + N_2 t_2 + \dots} = \frac{\Sigma_1 H_{\text{ис.п}} \cdot N_{\text{п}} t_{\text{п}}}{\Sigma_1 N_{\text{п}} t_{\text{п}}} \quad . \quad . \quad . \quad 28.$$

Здесь $H_{\text{ис.п}}$ — неизменное значение $H_{\text{ис}}$ при нагрузке $N_{\text{п}}$ — продолжительностью $t_{\text{п}}$ часов.

Для гидроэлектростанции в целом, $H_{\text{ис.ст}}$ за сутки может определяться как средневзвешенное значение $H_{\text{ис}}$ отдельных турбин в соответствии с выработкой или средней мощностью агрегатов за сутки.

На рис. 2 фиг. 1 показан баланс напоров гидроэлектростанции для работы канала ГЭС в режиме спада кривой свободной поверхности и на фиг. 2 — в режиме подпора.

За отметку нормального расчетного горизонта верхнего бьефа $\Gamma_{\text{н}}$ принят горизонт в напорной камере при установившемся расчетном максимальном расходе воды в деривации $Q_{\text{расч}}$ и соответствующей ему нормальной глубине наполнения h_0 .

Потери напора в верхнем бьефе представляют собою разность горизонтов верхнего бьефа проектного $\Gamma_{\text{нп}}$ и фактического $\Gamma_{\text{нф}}$ в начале деривации и могут быть разбиты на потери из-за сработки верхнего бьефа или сезонных колебаний в нем и на потери на входе

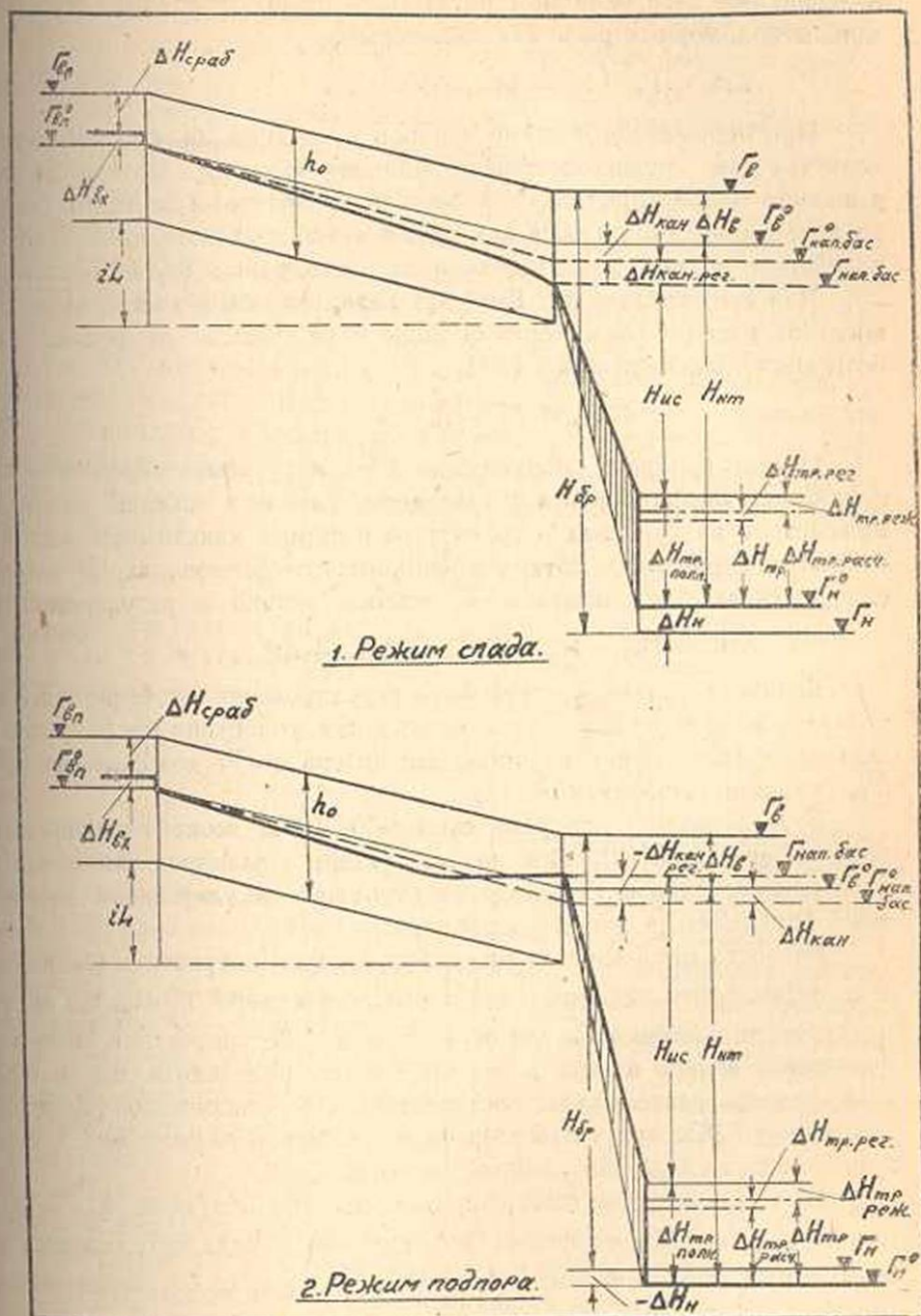


Рис. 2. Баланс напоров гидроэлектростанции при различных режимах работы деривации.

Увеличение значения потерь напора в канале против предыдущих испытаний (и против расчетного $H_{\text{кан}} = i \cdot L$) будет свидетельствовать о повышении коэффициента шероховатости канала в процессе эксплуатации.

Потери напора в канале вследствие регулирования могут быть, следовательно, определены из выражения:

$$\Delta H_{\text{кан, рег.}} = (\Gamma_{\text{н}}^0 - \Gamma_{\text{нап. бас.}}) - \Delta H_{\text{кан}} = \Gamma_{\text{нап. бас.}}^0 - \Gamma_{\text{нап. бас.}} \text{ м.} \quad 33,$$

то-есть $\Delta H_{\text{кан, рег.}}$ представляет собою разность горизонта в напорном бассейне при установившемся движении, расходе $Q_{\text{ср}}$ и нормальном наполнении канала $h_{\text{нал}}$, и фактическим горизонтом в напорном бассейне.

Так как последний при наличии регулирования колеблется, то нужно взять средневзвешенную величину этой разности горизонтов.

Потери напора в напорном трубопроводе из-за трения и местных сопротивлений могут быть определены по разности отметок горизонтов напорной камеры и нижнего бьефа и показаний манометров на турбинах

$$\Delta H_{\text{тр. полн}} = (\Gamma_{\text{нап. бас.}} - \Gamma_{\text{н}}^0) - H_{\text{ис}} \text{ м.} \quad 34.$$

При переменных горизонтах, а также напорах на турбинах, разность в скобках и величина $H_{\text{ис}}$ могут быть определены как средневзвешенные величины (см. формулу 28), тогда

$$\Delta H_{\text{тр. полн}} = \frac{\sum_1^n (\Gamma_{\text{нап. бас.}} - \Gamma_{\text{н}}^0)_{\text{п}} \cdot N_{\text{ст. п}} \cdot t_{\text{п}}}{\sum_1^n N_{\text{ст. п}} \cdot t_{\text{п}}} - \frac{\sum_1^n H_{\text{ис. п}} \cdot N_{\text{ср. п}}}{\sum_1^n N_{\text{ср. п}}} \text{ м.} \quad 35$$

Величина полных потерь напора в трубопроводах станции (формула 34) превышает, как правило, величину потерь в трубопроводах, которая была бы в них при той же суточной выработке, но равномерном графике нагрузки и работе нормально необходимого числа агрегатов. Причиной этому служит наличие дополнительных потерь вследствие переменного режима работы, например, при суточном регулировании, а также от невыгодного распределения нагрузки между агрегатами, от работы агрегатов, питаемых общим трубопроводом при возможности работы агрегатов с индивидуальными трубопроводами и др., то-есть вследствие потерь от регулирования и режимных потерь.

Потери на трение по длине напорного трубопровода пропорциональны квадрату расхода воды (скорости) [11].

На станции должны быть заранее построены кривые потерь или КПД трубопроводов в зависимости от нагрузки турбин (расходов), $\Delta H_{\text{тр}} = f(N)$, ежегодно проверяемые.

На основании данных средней нагрузки за сутки, для необходимого числа агрегатов, покрывающих эту нагрузку по кривым, могут быть определены средние потери напора в трубопроводах при равномерной нагрузке $\Delta H_{\text{тр}}$. (станция без суточного регулирования).

Следовательно

$$\Delta q_{\text{ст, нап}} = \Delta q_{\text{н, нап}} + \Delta q_{\text{н, нап}} + \Delta q_{\text{хан, нап}} + \Delta q_{\text{тр, нап}} + \Delta q_{\text{рег, нап}} + \Delta q_{\text{рег, нап}} \quad 41.$$

Потери расхода:

Составляющая удельного единичного расхода от полных потерь расхода (формула 21):

$$\Delta q_{\text{ст, расх}} = \frac{(W_{\text{ст}} - W_{\text{т}}) H_{\text{бр}}}{\Delta_{\text{ст}}} = \frac{(\Delta W_{\text{сооп}} + \Delta W_{\text{сброс}}) H_{\text{бр}}}{\Delta_{\text{ст}}} \text{ м}^3/\text{кВтч при 1 м напора.}$$

$W_{\text{ст}}$ определяется в м^3 по показаниям лимниграфов или реек в тарифированном створе начала деривационного канала.

Если в деривацию поступает расход воды меньший ее пропускной способности, а в верхнем бьефе имеются утечки или слив, то последние учитываются в величине $W_{\text{ст}}$ в размерах, дополняющих поступающий расход до пропускной способности деривации. В том случае, когда для работы ГЭС производятся специальные пуски из расположенного выше водохранилища, то весь сливаемый сток по пускам должен быть учтен в $W_{\text{ст}}$. Из величины $W_{\text{ст}}$ должно быть исключено количество воды, отбираемое из деривации другими водопользователями (ирригация, водоснабжение).

$W_{\text{т}}$ определяется в м^3 по расходомерам (водомерам) на турбинах за рассматриваемый промежуток времени.

$H_{\text{бр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ определяются, как указывалось раньше.

Потери стока в сооружениях могут быть разложены на 4 элемента:

$$\Delta W_{\text{сооп}} = \Delta W_{\text{пром}} + \Delta W_{\text{фил}} + \Delta W_{\text{тех}} + \Delta W_{\text{ут}} \text{ м}^3 \quad 42.$$

где: $\Delta W_{\text{пром}}$ включает расход воды на промыв отстойного бассейна от наносов, сброс шуги, льда, мусора, расход воды при манипуляциях с затворами против замерзания; учет воды производится по продолжительности работы тарифированного водослива или щитового отверстия;

$\Delta W_{\text{фил}}$ включает расход воды на фильтрацию в канале, напорной камере, бассейне суточного регулирования, отстойнике и др. Величина $\Delta W_{\text{фил}}$ зависит от рода грунта, типа и состояния облицовки сооружений, глубины наполнения, скорости воды в канале, температуры, размеров сооружений и может быть вычислена достаточно точно для рассматриваемого сезона и режима* [12].

$\Delta W_{\text{тех}}$ включает расход воды, забираемой из деривации на технические нужды станции, могущий быть легко и достаточно точно определен простыми замерами;

* Здесь не рассматривается режим потерь в водохранилище, а также в верхнем бьефе плотины на фильтрацию через плотину, на испарение и т. д.

$\Delta W_{\text{ут}}$ включает расход воды на утечки через уплотнения в щитах и затворах гидротехнических сооружений, в затворах на стоящих агрегатах. Утечки часто можно определить непосредственным замером. Если же их измерить не удастся, то можно определить по разности:

$$\Delta W_{\text{ут}} = (\Delta W_{\text{ст}} - W_{\text{т}}) - (\Delta W_{\text{пром}} + \Delta W_{\text{фил}} + \Delta W_{\text{тех}} + \Delta W_{\text{сброс}}) \text{ м}^3 \quad 43.$$

Для целей текущего контроля эксплуатации достаточно определять суммарно потери стока на фильтрацию и утечки по формуле, вытекающей из выражения 43.

$$\Delta W_{\text{ут. и фил}} = (W_{\text{ст}} - W_{\text{т}}) - (\Delta W_{\text{пром}} + \Delta W_{\text{тех}} + \Delta W_{\text{сброс}}) \text{ м}^3$$

Потери стока вследствие прямых сбросов на станции могут быть разложены на 3 элемента. Определяются эти потери по продолжительности работы терированного водослива.

$$\Delta W_{\text{сброс}} = \Delta W_{\text{д}} + \Delta W_{\text{ав}} + \Delta W_{\text{рем}} \text{ м}^3 \quad 44,$$

где: $\Delta W_{\text{д}}$ включает сбрасываемую воду вследствие непринятия нагрузки потребителями (нагрузка ниже планового графика) или из-за неправильного режима работы БСР при суточном регулировании;

$\Delta W_{\text{ав}}$ включает сброс воды вследствие снижения нагрузки на ГЭЦ из-за аварии;

$\Delta W_{\text{рем}}$ включает сброс воды из-за ограничения рабочей мощности ГЭЦ (по машинам) вследствие нахождения оборудования в ремонте, при мощности по воде, превышающей рабочую мощность. Сюда же должен быть включен расход воды, идущий при сушке, балансировке и испытании агрегатов.

Разделение величины $\Delta W_{\text{сброс}}$ на составляющие не представляет затруднений.

Определив потери расхода (стока) по различным причинам, на основании формулы 21 можем вычислить элементы составляющей удельного единичного расхода ГЭЦ от полных потерь расхода.

$$\left. \begin{aligned} \Delta q'_{\text{пром}} &= \Delta W_{\text{пром}} \frac{H_{\text{бр}}}{\Delta \epsilon_{\text{ст}}} \\ \Delta q'_{\text{фил}} &= \Delta W_{\text{фил}} \frac{H_{\text{бр}}}{\Delta \epsilon_{\text{ст}}} \\ \Delta q'_{\text{тех}} &= \Delta W_{\text{тех}} \frac{H_{\text{бр}}}{\Delta \epsilon_{\text{ст}}} \\ \Delta q'_{\text{ут}} &= \Delta W_{\text{ут}} \frac{H_{\text{бр}}}{\Delta \epsilon_{\text{ст}}} \\ \Delta q'_{\text{сброс}} &= \Delta W_{\text{сброс}} \frac{H_{\text{бр}}}{\Delta \epsilon_{\text{ст}}} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{м}^3/\text{квтч при приведении ГЭЦ} \\ \text{к 1 м напора} \end{array} \quad 45$$

Следовательно

$$\Delta q_{\text{ст. расх}} = \Delta q_{\text{пром}} + \Delta q_{\text{фил}} + \Delta q_{\text{ут}} + \Delta q_{\text{ге}} + \Delta q_{\text{сброс}} \quad . \quad . \quad . \quad 46.$$

Анализ составляющей удельного единичного расхода, использованной в агрегатах станции

Формулу 23 для удельного единичного расхода нетто станции можно представить в следующем виде:

$$q_{\text{ст. нет}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot H_{\text{ис}}}{\Theta_{\text{ст}}} = 367 + \Delta q_{\text{т}} + \Delta q_{\text{г}} \text{ м}^3/\text{квтч при } 1 \text{ м} \quad . \quad . \quad . \quad 47,$$

где $\Delta q_{\text{т}}$ — составляющая удельного единичного расхода от потерь в турбине,

$\Delta q_{\text{г}}$ — составляющая удельного единичного расхода от потерь в генераторе.

С другой стороны, из выражения 8 следует:

$$q_{\text{ст.}} = \frac{367}{\eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{г}}} \text{ м}^3/\text{квтч при } 1 \text{ м напора на ГЭС} \quad . \quad . \quad . \quad 48$$

где $\eta_{\text{т}}$ — фактический КПД турбины,

$\eta_{\text{г}}$ — фактический КПД генератора.

Отношение потерь в турбине к потерям в генераторе будет равно

$$\frac{\Delta q_{\text{т}}}{\Delta q_{\text{г}}} = \frac{1 - \eta_{\text{т}}}{1 - \eta_{\text{г}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 49$$

Решая совместно уравнения 47 и 49, найдем выражения для вычисления составляющих потерь в турбине и генераторах

$$\Delta q_{\text{т}} = \frac{(q_{\text{ст. нет}} - 367)(1 - \eta_{\text{г}})}{2 - \eta_{\text{г}} - \eta_{\text{т}}} \text{ м}^3/\text{квтч при } 1 \text{ м} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 50$$

$$\Delta q_{\text{г}} = \frac{(q_{\text{ст. нет}} - 367)(1 - \eta_{\text{т}})}{2 - \eta_{\text{г}} - \eta_{\text{т}}} \text{ м}^3/\text{квтч при } 1 \text{ м} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 51.$$

На гидростанции должны быть заранее построены кривые зависимости КПД генераторов от нагрузки и $\cos \varphi$ $\eta_{\text{г}} = f_1(N, \cos \varphi)$ и кривые зависимости КПД турбин от нагрузки при различных напорах $\eta_{\text{т}} = f_2(N, H)$.

По фактическим нагрузкам агрегатов и $\cos \varphi$, пользуясь указанными выше кривыми, можно определить значение средневзвешенного КПД генератора:

$$\eta_{\text{г}} = \frac{\eta_{\text{г}1} N_{\text{г}1} t_1 + \eta_{\text{г}2} N_{\text{г}2} t_2 + \dots}{N_{\text{г}1} t_1 + N_{\text{г}2} t_2 + \dots} = \frac{\sum_1^n \eta_{\text{г}} \cdot N_{\text{г}} \cdot t_{\text{г}}}{\sum_1^n N_{\text{г}} \cdot t_{\text{г}}} \quad . \quad . \quad . \quad 52,$$

где $\eta_{\text{г}}$ — КПД генератора при неизменной нагрузке $N_{\text{г}}$ и $\cos \varphi$ в продолжении $t_{\text{г}}$ часов.

КПД генераторов станции в целом будет равен

$$\eta_{г.ст} = \frac{\eta_{г1} \cdot N_{ср1} + \eta_{г2} \cdot N_{ср2} + \dots}{N_{ср1} + N_{ср2} + \dots} = \frac{\sum_1^n \eta_{г.п} \cdot N_{ср.п}}{\sum_1^n N_{ср.п}} \quad 53,$$

где: $\eta_{г.п}$ — средневзвешенный КПД генератора, работавшего со среднесуточной нагрузкой $N_{ср.п}$

Вычислив значение $\eta_{г.ст}$, вообще мало изменяющееся при изменении режима работы ГЭЦ, определяем по формуле 48 фактический КПД турбин

$$\eta_{т.ст} = \frac{367}{q_{ст.нет} \cdot \eta_{г.ст}}$$

Пользуясь формулами 50 и 51, находим составляющие потерь $\Delta q'_г$ и $\Delta q'_т$. Для определения дополнительных потерь в агрегатах вследствие неблагоприятного режима работы, например, из-за недогрузки или нерационального распределения нагрузки между агрегатами, можно применить следующий прием: по кривым $\eta_g = f_1(N, \cos \varphi)$ и $\eta_t = f_2(N, H)$ вычисляются средневзвешенные значения КПД генераторов η_g^0 и турбин η_t^0 с учетом нормального (экономичного) покрытия фактического графика нагрузки ГЭЦ и затем, по формулам 48, 50 и 51 определяется возможный удельный единичный расход нетто и его составляющие

$$q_{ст.нет}^0 = \frac{367}{\eta_g^0 \cdot \eta_t^0}; \Delta q'_г \text{ и } \Delta q'_т$$

Дополнительные потери в генераторе и турбине по сравнению с возможными потерями при рациональном режиме работы будут равны

$$\Delta q'_г - \Delta q_{гф}^0 \text{ и } \Delta q'_т - \Delta q_{тф}^0$$

Дополнительные потери в агрегате в целом из-за неблагоприятного режима будут равны:

$$\Delta q'_{реж.агр} = q_{ст.нет} - q_{ст.нет}^0 \text{ м}^3/\text{квтч при 1 м напора на ГЭЦ} \quad 54$$

Итак, удельный единичный расход воды на станции может быть представлен состоящим из суммы составляющих потерь в элементах сооружений и оборудования, что позволяет выявлять источники и размер потерь выработки, подлежащие устранению.

$$q'_{ст} = 367 + \Delta q'_{ст.нап} + \Delta q'_{ст.расх} + \Delta q'_{ст.т} + \Delta q'_{ст.г} \text{ м}^3/\text{квтч при 1 м напора} \quad 55$$

Если при вычислении удельного расхода воды на ГЭЦ подведенную и полезную энергию выразить в одних и тех же единицах—

киловаттчасах или килограммометрах, то выражение для удельного единичного расхода примет следующий вид:

$$q''_{ст} = \frac{q_{ст}}{367} = \frac{W_n \cdot H_{бр}}{367 \cdot \Theta_{ст}} = \frac{1}{\eta_{ст}} \quad . \quad . \quad . \quad 56$$

$$q''_{сист} = \frac{q_{сист}}{367} = \frac{\sum_1^n W_n \cdot H_{бр.п}}{367 \cdot \sum_1^n \Theta_{ст.п}} \quad . \quad . \quad . \quad 57$$

Структура выражения q'' позволяет также трактовать q'' как условный удельный расход (в $м^3/квтч$) при приведении станций к одному метру напора, но уменьшенный в 367 раз.

Применяя в качестве показателя эффективности величину q'' , при анализе ее мы будем оперировать с дробными значениями потерь и формула 55 примет следующий вид:

$$q''_{ст} = 1 + \Delta q''_{ст. нап} + \Delta q''_{ст. расх} + \Delta q''_{ст. т} + \Delta q''_{ст. г} \quad . \quad . \quad . \quad 58.$$

Анализ удельного единичного расхода для гидроэнергосистемы

Приведенный выше анализ удельного единичного расхода воды на станции, при кажущейся его сложности, просто и легко осуществим. Подобный анализ необходим для выявления дефектных узлов на ГЭС, являющихся источником потерь выработки. Полный анализ показателя нет нужды производить ежедневно, но он обязателен для характерных режимов (сезонов). Для полного анализа достаточно взять характерные сутки. Анализ же по укрупненным составляющим (например уравнение 55) с выделением сбросов, чрезвычайно прост, но очень важен для текущего контроля режима работы ГЭС, повышения персонала и др.

Имея составляющие удельного единичного расхода по гидростанциям системы, согласно таблице 1, можем вывести составляющие для удельного единичного расхода гидроэнергосистемы (см. табл. 1).

Отдельные составляющие единичного расхода для энергосистемы, не указанные в таблице 1, могут быть вычислены по следующей формуле:

$$\Delta q''_{ст. п. к} = \frac{\Delta q_{ст1к} \cdot \Theta_{ст1} + \Delta q_{ст2к} \cdot \Theta_{ст2} + \dots}{\Theta_{ст1} + \Theta_{ст2} + \dots} = \frac{\sum_1^n \Delta q_{ст. п. к} \cdot \Theta_{ст. п}}{\sum_1^n \Theta_{ст. п}} \quad 59,$$

где: $\Delta q_{ст. п. к}$ — составляющая удельного единичного расхода станции от вида потерь — К,

$\Theta_{ст. п}$ — выработка станции п за рассматриваемый промежуток времени (сутки).

Принципы нормирования энергетического показателя режима для гидростанций и гидроэнергосистем

Анализ водного баланса гидростанций и гидроэнергосистем позволяет установить объективные нормы эффективности использования водотока на ГЭС, имеющих различное назначение в энергосистеме (регулирующие, базисные и др.), а также имеющих различный состав и тип сооружений и оборудования. Использование для этой цели удельного единичного расхода воды наиболее удобно.

Таблица №1

Составляющие удельного единичного расхода воды для ГЭС и гидроэнергосистем

№ п.п.	ГЭС №1	—	ГЭС №2	Энергосистема	Исходные данные	№ № формул
1.	$q'_{ст.1}$	...	$q'_{ст.2}$	$q'_{удел.1}$	$W_{д.1}; M_{д.1}; Z_{ст.1}$	8 и 14
2.	$\Delta q'_{ст.1, макс.1}$	...	$\Delta q'_{ст.1, макс.2}$	$\Delta q'_{ст.1- макс.1}$	$W_{д.1}; M_{д.1}$	18 и 20
	$\Delta q'_{8.1}$	...	$\Delta q'_{8.2}$		ΔW_8	40
	$\Delta q'_{9.1}$	...	$\Delta q'_{9.2}$		ΔW_9	
	$\Delta q'_{10.1}$	...	$\Delta q'_{10.2}$		$\Delta W_{10}; q_{удел.1} = f(q)$	
	$\Delta q'_{11.1}$	...	$\Delta q'_{11.2}$		$\Delta W_{11}; q_{удел.1} = f(N)$	
	$\Delta q'_{12.1}$	...	$\Delta q'_{12.2}$		ΔW_{12}	
3.	$\Delta q'_{отс.1, макс.1}$	...	$\Delta q'_{отс.1, макс.2}$	$\Delta q'_{отс.1, макс.1}$	—	21 и 22
	$\Delta q'_{13.1}$	...	$\Delta q'_{13.2}$		$\Delta W_{13.1}$	45
	$\Delta q'_{14.1}$	...	$\Delta q'_{14.2}$		$\Delta W_{14.1}$	
	$\Delta q'_{15.1}$	...	$\Delta q'_{15.2}$		$\Delta W_{15.1}$	
	$\Delta q'_{16.1}$	...	$\Delta q'_{16.2}$		след. по разности	
4.	$q'_{ст.1, мин.1}$	...	$q'_{ст.1, мин.2}$	$q'_{удел.1, мин.1}$	—	23 и 25
	$\Delta q'_{17.1}$	...	$\Delta q'_{17.2}$		$q_{уд.1}; q_{уд.2} = f(N, \cos \varphi)$	50
	$\Delta q'_{18.1}$	...	$\Delta q'_{18.2}$		—	51
	$\Delta q'_{19.1}$	...	$\Delta q'_{19.2}$		$q_{уд.1}; q_{уд.2}; q_{уд.3} = f(N, H)$	54 *)

*) Дополнительный показатель, характеризующий отклонение от благоприятных режимов работы агрегатов.

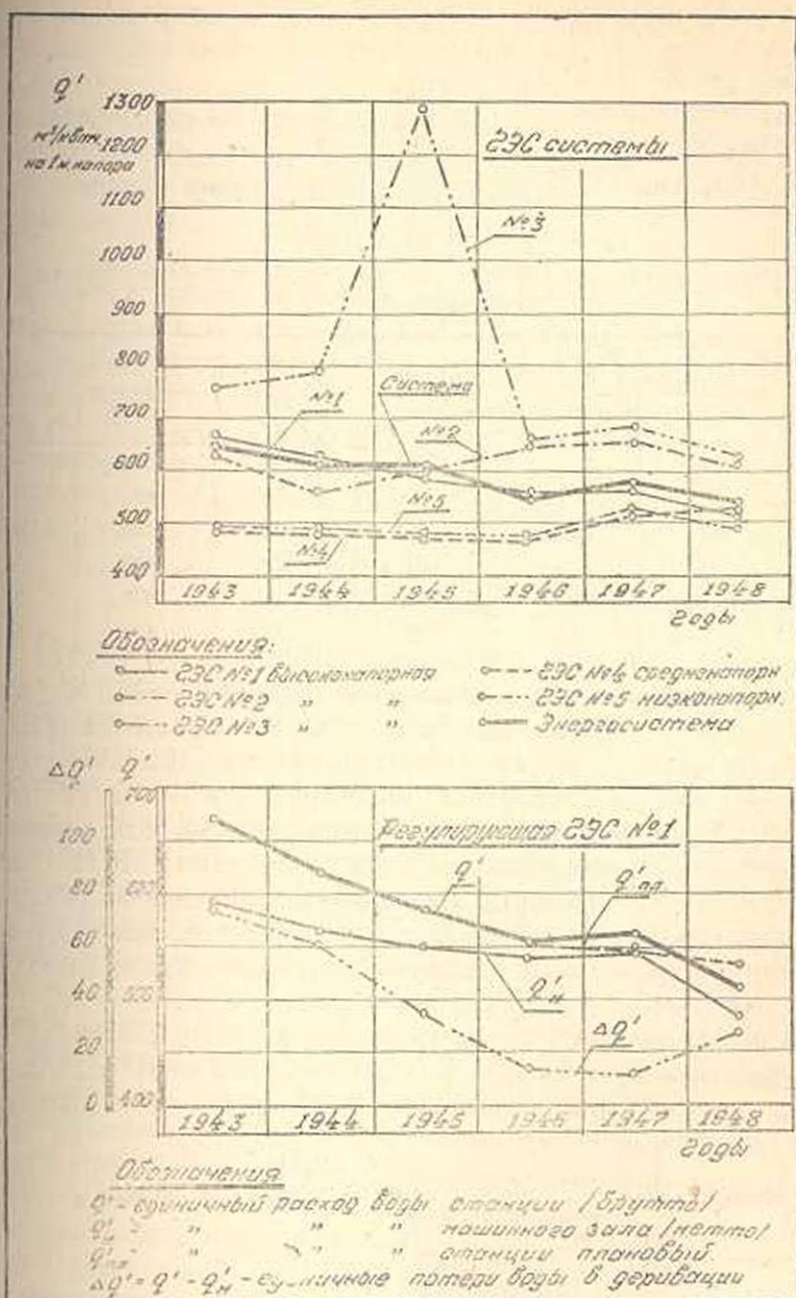


Рис. 3. Показатели водно-энергетического режима гидроэлектростанций системы Арменэнерго.

В виде иллюстрации в таблице 2 и рис. 3 приведены средние годовые удельные единичные расходы воды по гидростанциям Армянской энергетической системы, а также единичные расходы энергосистемы в целом за шесть лет [13].

ГЭС № 1 является основной регулирующей гидростанцией системы. ГЭС № 2 имеет небольшие возможности суточного регулирования. Остальные ГЭС работают в базе графика нагрузки.

Таблица

Удельные единичные расходы воды гидростанций и энергосистемы
Армянской ССР

Годы	ГЭС № 1 высокона- порная	ГЭС № 2 высокона- порная	ГЭС № 3 высокона- порная	ГЭС № 4 среднена- порная	ГЭС № 5 низкона- порная	Вся энерго- система
1943	671	628	758	490	492	647
1944	628	562	790	490	492	618
1945	586	606	1295	478	482	609
1946	555	652	661	479	480	552
1947	563	656	688	516	528	576
1948	512	613	625	514	498	532

Увеличение удельного единичного расхода по ГЭС № 2 в 1946 и 1947 гг. связано с вынужденным, по условиям ремонтов гидросооружений, режимом и не является характерным. Высокие значения уд. ед. расходов по ГЭС № 3 и увеличение их в 1944 и 1948 гг. по ГЭС № 4 и № 5 связаны со значительными потерями воды в деривации по причине ненадлежащего состояния последней, а по ГЭС № 3, кроме того, из-за интенсивной шуги. Планомерное снижение величины уд. ед. расходов по ГЭС № 1, ГЭС № 2 и энергосистеме, является результатом работы, проводимой в системе по рационализации водно-силового режима [14].

На основании анализа фактических уд. ед. расходов по ГЭС можно наметить пределы для среднегодовых значений уд. ед. расходов в зависимости от назначения ГЭС в системе и характеристик ее оборудования.

Базисные ГЭС 470—520 м³/квтч при 1 м напора

Регулирующие ГЭС 480—560 " "

Пиковые ГЭС 520—600 " "

Указанные величины уд. ед. расходов применимы главным образом для высоконапорных ГЭС средней и большей мощности.

Уточнение этих значений уд. ед. расходов должно быть произведено на основании анализа составляющих единичного расхода (таблица 1) для различных ГЭС.

Потери воды на некоторых гидростанциях достигают весьма внушительных размеров [15]. Величина потерь на утечки через

уплотнения механизмов и оборудования сооружений на некоторых ГЭС достигает 18% годового стока воды. Расход воды на сброс шуги, льда, мусора, промыв и удаление наносов доходит иногда до 28% от годового стока. Потери расхода воды, связанные с режимом работы ГЭС в системе, происходящие часто по вине диспетчера или из-за отсутствия нагрузки, достигают в некоторых случаях до 15—20% от годового стока. При работе агрегатов с недогрузкой (работой одним лишним агрегатом) потери энергии могут составить 2—3% суточной выработки ГЭС.

Удельный единичный расход воды учитывает все потери выработки и позволяет выявлять их, и поэтому является действительным энергетическим показателем эффективности использования воды на ГЭС и в гидроэнергосистеме. Он позволяет объективно сравнивать работу как отдельных ГЭС, так и гидроэнергосистем, выявлять и нормировать различные виды потерь воды и напора.

Для оценки эффективности эксплуатации ГЭС этот показатель должен служить одним из основных нормативов.

В ы в о д ы

1. Применение „удельного единичного расхода“ воды, как показателя и метода анализа его, позволяет объективно сравнивать по эффективности работы отдельные гидростанции и гидроэнергосистемы.

2. Предлагаемый метод анализа водобаланса (энергобаланса) гидростанции на основе применения „удельного единичного расхода“ воды легко осуществим, соответствует современным требованиям культуры эксплуатации гидростанций и позволяет выявить источники всех основных составляющих потерь выработки.

3. Возможно объективное нормирование показателя эффективности работы гидростанций на основании проведения предложенного анализа водобаланса для гидростанций различных типов, состава сооружений и назначения в энергосистеме.

4. Проведение контрольных анализов водобаланса по укрупненным составляющим потерь на действующих гидростанциях должно дать существенный эффект в отношении улучшения водно-энергетического режима гидростанции, повышения выработки энергии, стимулирования работы эксплуатационного персонала.

5. Возможность использования предложенного показателя эффективности гидростанции при проектировании и строительстве ГЭС может быть установлена после дополнительной проработки.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР

Поступило 24 IV 1949.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. С. Баумгарт.—Опыт эксплуатации ГЭС. Тр. 2-го Всесоюз. совещ. по эксплуатации гидроэлектростанций. 1946, стр. 63.
2. В. В. Болотов.—Теоретические основы выбора экономичного режима сложной электроэнергетической системы. 1947, стр. 14.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. МЭС СССР 1943, стр. 146.
4. Инструкция по составлению «отчета гидроэлектростанции о выполнении плана по производству» (форма Э—4—РГ), 1944, стр. 7.
5. Т. Л. Золотарев.—Планирование эксплуатации гидроэлектрических станций. Гидро-тех. стр.-во, № 2, 1941, стр. 11.
6. Т. Л. Золотарев.—Гидроэлектроцентраль в электроэнергетической системе. 1939, стр. 78.
7. И. М. Соколов.—Измерение, учет и нормирование потерь воды и напоров. Тр. 2-го Всесоюз. совещ. по эксплуатации гидроэлектростанций, 1946, стр. 35.
8. Г. Г. Горбунов.—Эффективность работы ГЭС, планирование и учет их эксплуатации. Тр. 2-го Всесоюз. совещ. по эксплуатации гидроэлектростанций. 1946, стр. 20.
9. А. К. Дарманчев.—Показатели и графики нагрузки энергет. систем, 1935, стр. 181.
10. А. А. Морозов.—Использование водной энергии, 1948, стр. 136.
11. И. В. Егизаров.—Гидроэлектростанции, ч. III. 1937, стр. 57 и 168.
12. А. А. Королев и С. С. Гинко.—Открытые подводящие каналы гидроэлектростанций, 1937, стр. 125.
13. В. П. Мартынов.—Универсальный показатель водноэнергет. режима гидроэлектростанции и гидроэнергосистемы. ДАН Арм. ССР, IX, № 1, 1948.
14. В. П. Мартынов.—К вопросу суточного регулирования в Армянской энергет. системе. Изв. АН Арм. ССР, № 9, стр. 50, 1947.
15. Д. О. Сейфулла.—Повышение эффективности работы ГЭС. Тр. 2-го Всесоюз. совещ. по эксплуатации гидроэлектростанций, 1946, стр. 38.

Վ. Պ. Մարտինով

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՑՈՒՑԱՆԻՇ՝ ՀԻՊՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԿԱՅԱՆԻ ԵՎ ՀԻՊՈՍԻՍԵՄԻ
ՋՐԱ-ՈՒԺԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԱՆԱԼԻԶԻ ՀԱՍԱՐ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հիդրոէլեկտրական կայանի պատճառներով տեղի ունի ջրի զգալի զերծախոս, որը պետք է գնահատվի այնպես, ինչպես վառելիքի զերծախոսը ջերմային էլեկտրակայաններում և պետք է արտացոլվի կայանի աշխատանքի արդյունավետության ցուցանիշներում:

Գոյություն ունեցող էներգետիկ ցուցանիշները լրիվ չեն արտահայտում գնահատան հիդրոէներգոցենտրալների ջրհոսքի արդյունավետ օգտագործման, էներգորալանի անալիզի և արտադրանքի կորուստի աղբյուրների հայտնաբերման, նրանց արդյունավետ աշխատանքի չափավորման համար իրար հետ համեմատելու և բնորոշելու պահանջները: Նույնը վերաբերում է նաև հիդրոէներգոսխառնման էներգետիկ ցուցանիշներին ամբողջությամբ վերցված:

Հեղինակն առաջարկել է ռեժիմի ռացիոնալ էներգետիկ ցուցանիշ, որը բավարար կերպով է ապահովում վերը բերված պահանջներին: Առանձին հիդրոկայանի համար այդ ցուցանիշը կոչվում է հիդրոկայանի ջրի տեսակարար եղակի ծախս և արտահայտվում է հետևյալ բանաձևով.

$$q'_{\text{էր}} = \frac{W_{\text{ն}} \cdot H_{\text{ծր.ն}}}{\Delta_{\text{էր.ն}}} = \frac{367}{\eta_{\text{ն}}} \text{ մ}^3 / \text{կվտժ կայանում 1 մ ճնշման դեպքում},$$

որակ՝ $W_{\text{ն}}$ — ջրի հոսքն է խորանարդ մետրերով, որը կտրելի է օգտագործել հիդրոէներգոցենտրալում, ջրատարի թողունակության սահմաններում,

$H_{\text{ծր.ն}}$ — հիդրոէներգոցենտրալի լրիվ հաշվային բրուտո ճնշումն է մետրերով,

$\Delta_{\text{էր.ն}}$ — հիդրոէներգոցենտրալի շինքի վրա կայանի արտադրանքն է կիլովատ ժամերով,

$\eta_{\text{ն}}$ — կայանի օգտակար գործունեության լրիվ գործակիցն է՝ փաստական,

$q'_{\text{էր}}$ — տեսակարար ծախսը, այսինքն հիդրոէներգոցենտրալին տարված էներգիայի (կզրմ) հարաբերությունը հիդրոցենտրալի շինքի վրա ստացված օգտակար էներգիային (կվտժ):

Թեև $q'_{\text{էր}}$ չափում չունեցող թիվ է, բայց գործնականում նրա օգտագործման հարմարության համար այն կարելի է զիտել որպես բրուտո ջրի օգտմանական տեսակարար ծախս (մ^3 կվտժ), եթե հիդրոէներգոցենտրալն ունենար մեկ մետր ճնշում և արտադրեր նույն քանակի էներգիա $\Delta_{\text{էր.ն}}$, իր միջով քաջ թողնելով $W_{\text{ն}} \cdot H_{\text{ծր.ն}}$ մ^3 ջրի հոսք:

Գործնականորեն մատչելի $q'_{\text{էր}}$ -ի միևնույն արժեքը հիդրոսարքավորումների, ջրանիվների և զենեքատուների օգտակար գործունեության հնարավոր մաքսիմալ գործակիցի սահմաններում կլինի՝ $q'_{\text{max}} = 420 \text{ մ}^3$ կվտժ մեկ մետր ճնշման դեպքում: Հիդրոէներգոսիստեմի համար ամբողջությամբ վերցրած դուրս է բերված նույնպիսի ցուցանիշ՝ հիդրոէներգոսիստեմի տեսակարար եղակի ջրի ծախս:

$$q'_{\text{էրտ}} = \frac{\sum_1^n W_{\text{ն}} \cdot H_{\text{ծր.ն}}}{\sum_1^n \Delta_{\text{էր.ն}}} \text{ մ}^3 / \text{կվտժ հիդրոէներգոցենտրալում 1 մ ճնշման դեպքում},$$

Այստեղ համարիչում ունենք պայմանական հոսք, որը պիտի անցնի սիստեմի բոլոր կայանների միջով, եթե նրանք բոլորը բերվեն մեկ մետր ճնշման: Հայտարարում արված է բոլոր հիդրոէներգոցենտրալների արտադրանքը:

Տեսակարար եղակի ջրի ծախսի օգնությամբ կարելի է համար կերպով կատարել հիդրոկայանի էներգոտրալանսի անալիզը:

Հիդրոէներգոցենտրալի շահագործման մեջ կիրառվող սովորական չափումների միջոցով $q'_{\text{էր}}$ մեծությունն ինչպես հիդրոէներգոցենտրալի, այնպես էլ հիդրոէներգոսիստեմի համար կարելի է բաժանել բաղնիքայուցիչ մասերի: Դա թույլ է տալիս հեշտ կերպով հայտնաբերել արտադրանքի կուրստների ազդյունները և ձևաք առնել նրանց վերացման միջոցները:

Հիդրոէներգացնարալում (դիսալսրապես բարձր ճնշման) ակտակարար եղակի ծախսի անալիզի հիման վրա կարելի է նշել ՎՇԷ տարեկան միջին արժեքների համար սահմաններ, որոնք կախված կլինեն սխտեմում հիդրոէներգացնարալի նշանակումից և նրա սարքավորման բնույթից:

Հիմնական հիդրոէներգացնարալներ	470—520 մ ³ /կվտմ 1 մ	ճնշման դեպքում,	
կարգավորիչ հիդրոէլեկտրակայաններ	480—560	»	»
սկիկային հիդրոէներգացնարալներ	520—600	»	»

Տեսակարար եղակի ծախսերի այդ արժեքների ճշտումը պետք է կատարել այն հիդրոէներգացնարալների ՎՇԷ բազկացուցիչների անալիզի հիման վրա, որոնք էներգասխտեմում ունեն տարբեր սարքավորում և նշանակում, հաշվի առնելով աշխատանքը տարվա տարբեր շրջաններում (եղանակներին) և այն փոփոխությունները, որոնք տեղի ունեն շահագործման շրջանում:

ГИДРОТЕХНИКА

С. Я. Вартазаров

Движение внутриводного льда в потоке

Успешность мероприятий по борьбе с шугой в сооружениях гидростанций определяется степенью знания условий движения шуговых масс в потоке и закономерностей, управляющих этим движением.

В основу дальнейшего изложения положены материалы наблюдений автора на реках Закавказья [1,2,3], некоторые литературные данные [4,5,6] и, главным образом, результаты исследований, проведенных на шуговой станции Водно-Энергетического Института Академии Наук Армянской ССР, на р. Ахуран.

1. Механизм всплывания частиц льда

С момента перехода потока в переохлажденное состояние в нем начинают зарождаться частицы внутриводного льда. Отдельные наблюдения на реках, а также лабораторные опыты [1] позволили установить, что возникновение зародышевых частиц имеет место по всей глубине потока. Не останавливаясь на физической стороне процесса, что будет дано нами особо, приведем наиболее характерные результаты опытов, проведенных на шуговой станции. Важность оценки условий этого процесса очевидна, так как этим удастся проследить за механизмом всплывания не только зародышевых частиц, но и сформировавшихся элементов внутриводного льда.

Опыты проводились в двух видах — отбором проб с различных глубин, при различных стадиях переохлаждения реки и в визуальном наблюдении за состоянием потока, при освещении его опущенными на дно канала мощными электро-лампами. Пробы брались в герметические стеклянные сосуды. При интенсивном освещении определялось насыщение пробы ледяными кристалликами.

Некоторые данные наблюдений приведены в таблице 1.

С достаточной достоверностью можно установить, что в первый период переохлаждения потока помимо тончайших пластинок льда, образующихся на поверхности потока, при ломке замерзающей поверхностной пленки, по всей глубине ясно наблюдаются кристаллы льда, крупностью в доли миллиметра. Наибольшая крупность частиц в пробах не превосходила 0,5 мм для единичных элементов.

Распределение насыщенности потока зародышевыми частицами имеет максимум вблизи центра, с постепенным уменьшением к дну и поверхности.

1 ⁰ воздуха	1 ⁰ воды	Сумма ср. сут. 1 ⁰ к дню наблюд.	Состоя- ние реки	Состоя- ние по- годы	Расход реки м ³ /с	Среди. скорость	Глубина реки в м
-5	-0,08	-4,2	Чисто	Ясно	4,6	1,7	1,4
-8	-0,01	-9,6	Неболь- шие за- береги, слабый ход шуги	Ясно	5,2	1,8	1,6

Таблица 1

Глуб. взятия пробы в м	Характеристика пробы
пов.	Частицы льда в незначительном количестве. Имеются крупные (до 2—3 мм) тонкие пластинки льда. Много мельчайших ледяных пылинок.
0,7	Проба насыщена мельчайшими частицами льда от пылинок до 0,5 мм. Проба представляет собой суспензию, состоящую из льда и воды.
1,3	Довольно значительное насыщение пробы частицами, однако меньше, чем в центре потока.
пов.	В пробе частицы шуги, чечевицеобразной формы. Концентрация 210 ⁰ / ₀ . Мелких зародышевых частиц нет.
0,8	Отдельные разрозненные частицы шуги. Отмечены случайные элементарные частицы.
1,5	Вода в пробе чистая. Кристаллики льда не замечены.

В непосредственной близости от дна, при тех гидравлических характеристиках реки, при которых проводились опыты, в пробе оказывались единичные частицы льда.

Таким образом, качественно подтверждается, что уравнения распределения частиц нулевой (практически) гидравлической крупности, даваемые В. М. Маккавеевым [7], О'Брайаном и М. А. Великановым [8], справедливы. Распределение этих частиц (безразлично наносов или льда) подчиняется нормальному закону, т. е. имеют вид:

$$v = v_0 \exp - \int_0^x \frac{C_m}{\varepsilon} dy \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (1),$$

в которой

v_0 — придонная (соотв. поверхностная) концентрация,

C_m — гидравлическая крупность частиц,

ε — коэффициент турбулентного перемешивания.

Аналогичная зависимость, из несколько иных соображений, дана Калинске [9].

По мере роста кристаллов льда, при поддержании соответствующих термических условий, гидравлическая крупность ледяных частиц возрастает и достигает конечного значения, свойственного данной форме льда, образующегося в определенном комплексе физико-гидрологических условий.

К этому времени распределение частиц меняется, как это видно из таблицы: уменьшается число зародышевых элементов и возрастает число сформировавшихся частиц. Для этой стадии зависимость (1) теряет силу.

Нашими наблюдениями [1] подмечено, что каждая форма внутриводного льда (шуги) имеет свойственную ей предельную крупность частиц.

Более крупные образования, движущиеся в потоке, являются следствием последующих процессов объединения элементарных частиц, что будет описано ниже.

Гидравлическая крупность сформировавшихся, элементарных частиц, зависит от их очертания, которое, как это установлено наблюдениями, может быть пластинчатое, сферическое и чечевицеобразное, реже — игольчатое.

На подавляющем большинстве горных рек наблюдается образование внутриводного льда сферической и чечевицеобразной формы.*

Несмотря на некоторые различия в форме отдельных частиц, могут быть установлены зависимости между гидравлической крупностью и средним диаметром частиц, представляющие интерес при расчете ледозащитных устройств.

* Причины возникновения тех или иных форм частиц внутриводного льда определяются процессами кристаллизации и в настоящем изложении не рассматриваются.

Характерной особенностью движения образовавшихся комьев является увеличение их гидравлической крупности, учащение столкновения комьев и объединение их в более крупные скопления. В образовавшихся комьях можно встретить как крупные, полностью сформировавшиеся частицы, так и частицы, находящиеся в процессе роста.

Таким образом, совместное движение частиц различной крупности и комьев шуги как бы увеличивает среднюю гидравлическую крупность частиц, вследствие чего мелкие частицы достигают верхних слоев потока почти в одно и то же время, что и крупные.

Аналогичное явление было замечено в наших лабораторных опытах, в которых, при пуске в поток смесидутых стеклянных шариков различной крупности, удачно моделирующих шугу, благодаря хорошей смачиваемости, крупные частицы заносились глубже, чем когда в поток были пущены лишь частицы большого диаметра.

Таблица 3

Глубина потока см	Средняя скорость см/сек	Состав смеси в % по диаметру частиц в мм					Характеристика движения
		2	2	5	7	10	
28	84	—	—	15	20	65	Частицы движутся в верхней трети потока. Крупные частицы концентрируются на поверхности.
28	86	15	15	15	15	40	Частицы распределены в верхних слоях потока, с убыванием крупности к дну. Отдельные частицы в 7—10 мм движутся вместе с мелкими в средней трети.
28	157	—	—	15	15	65	Частицы движутся в верхней половине потока. Крупные частицы движутся на поверхности.
28	155	15	15	15	15	40	Частицы распределены почти по всему сечению, с убыванием крупности к дну. Крупные частицы группируются вместе с мелкими и обнаруживаются в нижней трети потока. Движение крупных частиц устойчиво.

Это явление может быть объяснено следующим образом.

Как показано Бьеркнесом [10,11] и затем экспериментально подтверждено Шулейкиным [12] при движении в жидкости тел любой формы, между ними возникают т. н. пондеромоторные силы притяжения или отталкивания, в зависимости от того, движутся ли тела рядом или друг за другом. При движении рядом имеют место наибольшие силы притяжения, определяемые по формуле

$$F = \pi \rho \frac{v^2}{2g} - \frac{r^6}{l^4} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4),$$

в которой

F — сила взаимодействия,

r — радиус тела,

l — расстояние между центрами тяжести,

v — скорость движения тел,
 ρ — плотность жидкости,
 g — ускорение силы тяжести.

При движении тел друг за другом проявляются силы отталкивания, определяемые по той же формуле, но с обратным знаком. При движении тел так, что линия, соединяющая их центры, составляет $54^\circ 40'$ к направлению движения, силы взаимодействия равны нулю.

Именно вследствие этого взаимодействия происходит сближение частиц и их последующее формирование в комья, а также возникают характерные разрывы в шуговых пластах (см. табл. 4) по длине потока и самостоятельное движение частиц и комьев друг за другом, легко наблюдаемое при малой концентрации шуги.

Поле пондеромоторных сил накладывается на скоростное поле турбулентного потока (см. ниже), взаимодействуя с ним и определяя движение шуги.

Чем больше скопление частиц, т. е. чем больше r этого скопления и чем больше гидравлическая его крупность, т. е. $C_{ш}$, тем, очевидно, будут больше силы взаимодействия, тем интенсивней будет происходить накопление шуговых масс в верхних слоях потока.

Этот же процесс определяет возникновение шуговых пластов и ковров, покрывающих значительную площадь поверхности потока при дальнейшем движении частиц льда в установившемся потоке.

Для примера можно отметить, что при движении на поверхности потока двух комьев шуги с радиусом 0,2 м и на расстоянии 0,4 м, со скоростью 1 м/сек, сила притяжения (соотв. отталкивания) составит ≈ 3 кг.

Дополнительное понимание условий всплывания ледяных частиц и формирование комьев шуги, может быть получено из рассмотрения данных по осаждению коагулированных осадков в очистных сооружениях.

Общезвестен факт интенсификации осаждения мелких частиц при введении коагулянта, образующего хлопья, захватывающие значительное количество мелких фракций наносов, которые сами по себе оседают весьма медленно.

Интересную оценку влияния турбулентности на процессы осаждения дает Кэмп [13]. Он показывает, что при наличии в бассейне различных фракций (напр. двух), число столкновений частиц диаметром D_1 и D_2 в количестве n_1 и n_2 , на единицу объема, выразится следующим соотношением:

$$N = \frac{n_1 n_2}{6} \sqrt{\frac{f}{8\nu R}} v^2 (D_1 + D_2)^2 \quad (5),$$

где f — коэффициент сопротивления,
 ν — коэффициент кинематической вязкости,
 R — гидравлический радиус потока,
 v — средняя скорость потока.

Эта зависимость показывает, что число столкновений частиц за-

висит не только от числа частиц и их диаметров, но и пропорционально $v^{1.5}$ и обратно пропорционально $\sqrt{R}$.

Следовательно, наличие некоторой скорости течения является фактором благоприятным для осаждения или всплытия, и потому в медленно движущемся потоке явление будет происходить более интенсивно, чем в стоячей воде.

Очевидно, что скорость не должна превосходить некоторого предела, увязанного с диаметром частиц, после которого турбулентность начинает влиять отрицательно, тормозя осаждение и разрушая образовавшиеся скопления.

Кэмп указывает на наблюдающееся на большинстве очистных сооружений ускорение осаждения за счет хлопьеобразования, благодаря которому теряется различие между скоростями падения частиц различного диаметра; аналогичный процесс — образование комьев шуги.

Изложенное дает возможность ближе уяснить картину всплытия ледяных частиц в потоке со слабой турбулентностью, в котором $\tau_{\text{в}} < C_{\text{ш}}^*$.

Всплытие ледяных частиц различных размеров, с средней гидравлической крупностью, определяемой по формулам (2) и (3), происходит под действием вертикальных компонентов скоростей, подъемной силы частиц и пондеромоторных сил, заставляющих одиночные частицы сближаться и формировать небольшие скопления — комья, а затем уже мощные пласты шуги на поверхности потока. Турбулентность потока, до определенного предела, способствует формированию шуговых скоплений, а следовательно и ускорению всплытия. При наличии в потоке частиц различной гидравлической крупности нет существенного различия между их скоростью всплытия, в силу взаимного влияния частиц.

Образовавшиеся на поверхности пласты шуги движутся, следуя за скоростным полем потока.

Кинематика потока, насыщенного шугой

Движение крупных частиц шуги в чистой воде создает своеобразную визуализацию потока, что позволяет проследить за характером течения в различных стадиях ледообразования.

Опыты Б. А. Фидмана, проведенные им в лаборатории русловых процессов М. А. Великанова, по киносъемке движущихся в потоке частиц [14, 15], убедительно показали, что схема пронизывания всей толщи потока вихрями, срывающимися от дна и стенок, не имеет места.

* Всяду, где идет речь о характерной величине $C_{\text{ш}}$, мы подразумеваем сред-

нее значение для множества частиц и именно $C_{\text{ш}} = \frac{\sum_{k=1}^n m C_{\text{ш}k}}{\sum_{k=1}^n m}$, где n — число частиц.

Наши опыты с моделями шуги также не обнаружили резких вертикальных токов; помимо общего движения вверх частиц с отрицательной гидравлической крупностью, распределенные в верхней зоне частицы двигались с очень незначительными вертикальными смещениями, которые скорей определялись взаимодействием частиц, чем структурой потока.

Особенно ярко этот вид течения был наблюден нами на шуговой станции. Как одиночные частицы льда, так и комья до формирования шуговых пластов движутся параллельно дну с незначительными колебаниями. Подъем и опускание взвешенных элементов определялись местными отклонениями течения при обтекании камней. Над гравелистым или песчаным дном скопления шуги проносятся с почти параллельной дну траекторией.

Интересно отметить, что уровень турбулентности определяет степень дисперсности шуговых скоплений, но мало меняет форму движения.

Формирование пластов шуги, плывущих по поверхности реки или канала, находится в зависимости от скоростного режима потока и количества шуги.

Раздробление пластов происходит при скоростях свыше 2,5—3 м/сек. Предельная скорость для устойчивости их дана ниже.

В большинстве случаев шуговые пласты движутся по поверхности реки, заполняя зеркало с различной степенью сплошности. Характер этого явления был нами подробно освещен [3].

Поскольку вертикальные компоненты скорости в незначительной степени влияют на устойчивость движения шуги, обладающей значительной гидравлической крупностью, следует искать иной, более мощный механизм, который был бы способен разрушить шуговые скопления и увлечь их в глубину.

Как показали наблюдения автора над транспортирующими шугу потоками, этим механизмом нужно считать поперечную циркуляцию.

Вряд ли требуется доказательство наличия в руслах поперечной циркуляции после работ Лосиевского, Громеки, А. Л. Миловича и М. В. Потапова; поскольку однако непосредственные наблюдения над явлением встречаются довольно редко и картина движения строится по косвенным данным, уместно привести некоторые характеристики, полученные в наших работах на шуговой станции.

Для наблюдения был выбран прямолинейный участок длиной в 250—300 м, т. е. 10—12 В с последующим поворотом, на р. Ахурян, выше плотины Ленинанканской ГЭС.

Как указывалось, благодаря наличию скоплений шуги разной крупности и прозрачности воды, поток хорошо просматривался на всю глубину.

Картина движения представляется в следующем виде:

На прямолинейном участке реки можно наблюдать пологий парный винт с шагом в 10—15 глубин потока. Высота винта примерно равна глубине реки (рис. 1).

Скопление шуги выносится из центральной части сечения, проходит вдоль дна*, поднимается вновь кверху и накапливается в прибрежной части реки, давая характерную для движения шуги максимальную концентрацию в зоне с максимальной скоростью.

Таким образом прекрасно иллюстрируется схема движения циркуляционного потока, даваемая М. В. Потаповым [16,17, 18] (рис. 1), и подтверждается интересная схема турбулентного потока, даваемая Лейли [19] (рис. 2). Зоны максимальной турбулентности дают интенсивный выброс шуги, а в зоне максимальных скоростей происходит их концентрация.

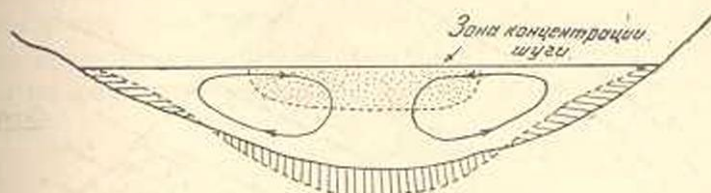
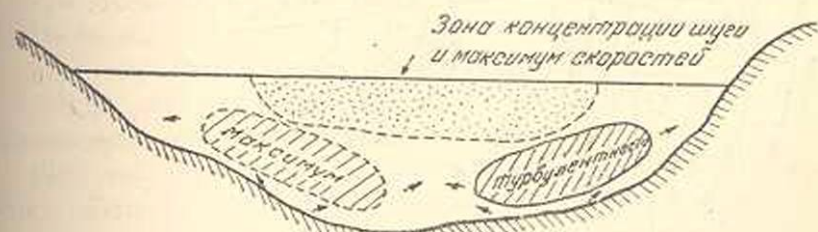
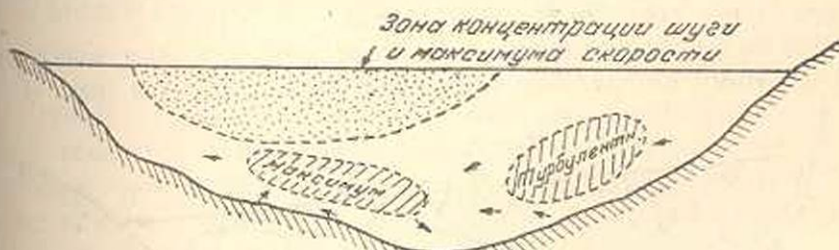


Рис. 1



а. прямолинейное русло



б. криволинейное русло

Рис. 2

* На этом этапе происходит зарождение «донного льда». Натолкнувшись на выступы дна частицы льда под действием гидродинамического давления примерзают вследствие режеляции и продолжают нарастать, пока подъемная сила накопившейся массы не превзойдет силы сцепления «донного льда» с дном реки, после чего происходит отрыв, и «донный лед» всплывает.

На повороте явление происходит следующим образом (рис. 3): винт, идущий вдоль внешней стороны закругления, развивается и захватывает почти все живое сечение; второй же—постепенно вырождается, а при крутом повороте вовсе теряется с тем, чтобы после поворота вновь развиться до нормальных размеров, соответствующих данному сечению. Шаг винта с 10–15 Н уменьшается до 4–7 Н на изгибе.

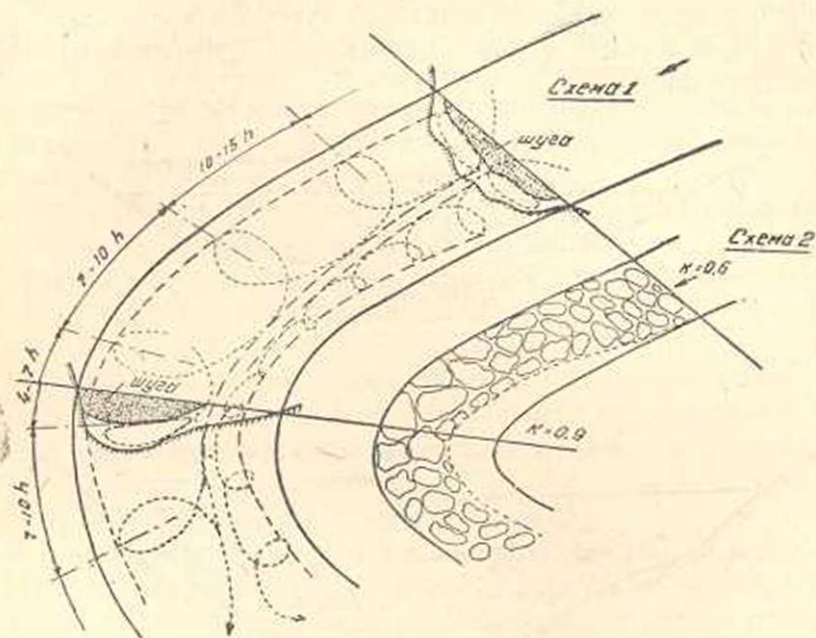


Рис. 3.

Вся шуга на повороте устремляется к внешней стороне кривой, образуя слой с неравномерной толщиной.

При больших скоплениях шуги слой движется, как монолитная масса, и потому направление винта несколько смещается (рис. 4).

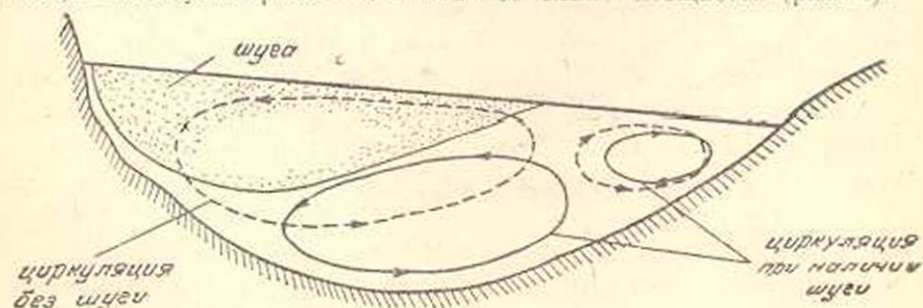


Рис. 4.

На прямых участках реки большой протяженности, с устойчивым, скалистым руслом, четкие контуры продольных циркуляционных те-

чений несколько скрадываются, уступая место местным циркуляциям ограниченной длины, перемежающимся по течению и по ширине реки. Благодаря этому, на таких больших участках наблюдается устойчивое движение шуговых пластов подобно тому, как показано на рис. 3.

Необходимо обратить внимание еще на одну особенность установившегося движения шуговых скоплений, имеющую значение для проектирования шугозащитных устройств.

Сравнительная монолитность и связность шуги определяется не только внутренними силами сцепления в слое между частицами, но и скоростным режимом пластов, движущихся, как и всякое плавающее в потоке тело, со скоростью большей, чем скорость потока. Величина превышения скорости пласта над скоростью потока определяется по формуле Коновалова [20] в следующем виде:

$$V_{ш} = V_{пов} + \frac{\sqrt{g i \gamma_m U}}{S \cdot k \gamma}$$

где: i — поверхностный уклон потока,

S — площадь миделевого сечения шугового пятна,

γ_m — объемный вес слоя шуги,

U — объем пласта,

k — коэффициент лобового сопротивления,

γ — удельный вес воды;

k принимается для тел неправильной формы в 0,5—0,6.

Величина превышения скорости движения тела над скоростью потока достигает 10—15%, что, вследствие возникновения между пластами пондеромоторных сил, приводит к сближению пластов и к устойчивому движению.

Развитие скорости $V_{ш}$ сверх скорости потока $V_{пов}$ происходит на некотором участке для преодоления сил инерции.

Силы, действующие внутри шугового слоя

После того как под действием циркуляционных течений, пульсаций скоростей и пондеромоторных сил произошло формирование шугового слоя, в нем проявляются внутренние силы между частицами, которые определяют поведение шуговых скоплений как однородных физических тел.

Каковы пределы условий, в которых внутренние силы сцепления шугового слоя сопротивляются внешним, разрушающим силам, будет установлено ниже.

Каждая частица в шуговом слое обвалакивается тончайшей пленкой воды. При движении по реке происходит постепенное уплотнение слоя, благодаря непрерывным колебательным движениям, испытываемым слоем под воздействием поверхностного волнения. Частицы различной формы и крупности, вибрируя, образуют плотную массу. На рис. 7 показаны различные стадии всплывания ледяных частиц и

уплотнения шугового слоя. Это уплотнение приводит к тому, что в установившемся состоянии шуговой слой движется с предельной концентрацией и между частицами шуги находится лишь молекулярная пленка воды, которая и определяет связность слоя силами поверхностного натяжения.

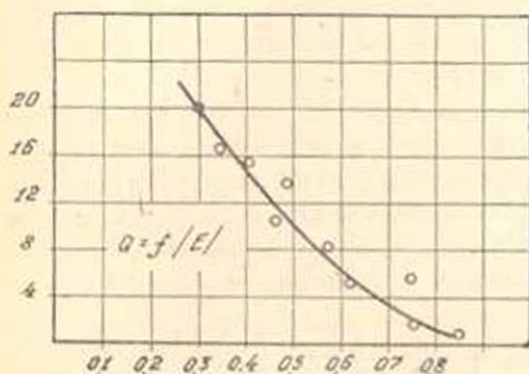


Рис. 5.

частиц под влиянием сил поверхностного натяжения.

Прежде всего необходимо установить предельную величину влагоемкости шугового слоя, которая, очевидно, будет отвечать, как и для условий грунта, полному заполнению пор шугового слоя водой. Для этого случая дается формула [21,22]

$$e = \frac{1}{\delta} \frac{1}{\Delta} \quad (7),$$

в которой

e — полная влагоемкость, в долях единицы объема,

δ — объемный вес слоя,

Δ — удельный вес частиц.

Поскольку, используя наши замеры концентрации шуги, можно установить значение e , то формулу (7) удобнее представить в ином виде:

$$\delta = \frac{1}{e + \frac{1}{\Delta}} \quad (8),$$

по которой определен объемный вес шуги.

Пористость шуги, движущейся или находящейся в зажоре, может быть определена по известной формуле

$$n = \left(-1 + \frac{\delta}{\Delta} \right) 100 \quad \text{в \%} \quad (9)$$

Объемный вес уплотненного шугового слоя, движущегося в потоке со слабой турбулентностью, получен, по данным замеров на шуговой станции в ЛенГЭС, равным в среднем 0,6.

Плотность потока, насыщенного шугой, получается из суммирования масс обеих фаз в виде

$$\rho_c = \rho(1 - av); \quad a = 1 - \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho} \quad (10),$$

где ρ — объемный вес воды,

$\rho_{\text{л}}$ — плотность льда, и

v — концентрация шуги.

Силы поверхностного натяжения определяются, как известно, образованием молекулярной пленки на границе раздела фаз (вода — воздух, вода — твердое тело) и равны 0,000075 кг/см для воды при 15°C. Взаимодействие жидкости с телом определяется смачиваемостью последнего, т. е. предельным углом растекания капли по поверхности тела. В случае льда угол смачиваемости равен 180°, т. е. имеет место полное растекание. С понижением температуры силы поверхностного натяжения увеличиваются с увеличением вязкости, и при 0° равны 79,5 дин/см для воды.

В общем виде выражение для сил поверхностного натяжения может быть записано

$$P = \frac{2\alpha}{r} \quad (11),$$

в котором:

α — коэффициент поверхностного натяжения,

r — радиус кривизны пленки.

В слое шуги поры заполнены водой и образуется, таким образом, двухфазная система: вода — шуга, силы сцепления в которой являются силами поверхностного натяжения.

Своеобразие распределения сил сцепления в грунтовой массе, насыщенной водой (случай аналогичный шуговому слою), хорошо учитывается формулой Покровского [24], который предполагает контакт между частицами, как контакт двух шаров

$$C_{\text{max}} = \frac{\pi\alpha}{4r} \left(\frac{1}{e} - 1 \right) \quad (12),$$

в которой:

C_{max} — максимальная сила сцепления,

α — сила поверхностного натяжения,

r — эффективный радиус частиц,

e — влагоемкость, по формуле (7) в долях единицы.

Подсчет по формуле (12) дает лишь порядок величин сил внутреннего трения, ввиду невыясненности истинного механизма взаимодействия между частицами в шуговом слое.

Силы сцепления сохраняют свое значение в описанном виде до тех пор, пока не происходит переохлаждение водяной пленки между частицами. При этом пленка занимает промежуточное положение

между жидкостью и льдом, в силу чего силы сцепления увеличиваются. Следует учесть, что, как показали специальные опыты, для кристаллизации тонких пленок требуется более низкая температура, и тем ниже, чем тоньше пленка.

При увеличении количества воды в порах шугового слоя расстояние между частицами увеличивается и приведенные зависимости теряют силу, т. к. капиллярные силы перестают действовать. В этом случае связность слоя определяется только динамическими условиями в потоке.

Под действием подъемной силы часть шугового слоя всплывает на высоту пропорциональную:

$$h = z \frac{\gamma_w - \gamma_{ш}}{\gamma_{ш}} \quad (13),$$

где z — толщина слоя шуги,

$\gamma_{ш}$ — объемный вес шугового слоя,

γ_w — удельный вес воды.

Соприкасаясь с холодным воздухом, верхний слой охлаждается и смерзается. Постепенно охлаждение распространяется в глубину погруженного слоя, вызывая его промерзание. Этим объясняется подмеченный неоднократно наблюдениями факт постепенного смерзания шуги с течением времени при ее движении по реке.

Количественная сторона явления пока не поддается сколько-нибудь точному определению, т. к. неизвестны условия распространения тепла в слое шуги.

Устойчивость движения шугового слоя

Движение шуговых слоев устойчиво на сравнительно ограниченном диапазоне гидравлических условий. При скоростях до 0,7—0,8 м/сек шуга движется у поверхности; с постепенным увеличением скорости отдельные частицы начинают заноситься в глубь потока, а при скоростях порядка 3 м/сек и выше все частицы более или менее равномерно распределяются по сечению [21].

Попытаемся охарактеризовать условия, которые способствуют отрыву элементов шугового слоя и их вовлечению в глубину.

Картина движения шуги в потоке и кинематика самого потока, описанные выше, дают основание считать, что в формировании шуговых скоплений на поверхности существенную роль играет винтовое, циркуляционное движение жидкости.

Циркуляционное течение, с продольной осью и циркуляцией жидкости в поперечном направлении, поднимаясь от дна направляется к поверхности и вновь опускается на дно. Два встречных винтовых движения создают комплекс руслообразующих процессов — размывы и намывы дна. В широком потоке могут иметь место несколько пар винтовых течений. Миловичем [25] доказано, что воздействие на поток может быть оказано только парой встречно вращающихся вин-

тов. Одиночный вихрь обладает только вращательным движением. Скорость циркуляции может быть получена из выражения

$$V = \sqrt{w^2 - u^2} \quad (14),$$

где w — полная скорость,
 u — продольная скорость.

В потоке размерами $a \times 2a$ полная скорость определяется в виде

$$w \approx 0,45 C \sqrt{4 \sin^2 \frac{\pi}{2a} y + \sin^2 \frac{\pi}{a} r} \quad (15),$$

причем C есть максимальная продольная скорость, которая может быть принята равной

$$C = \frac{U_{cp}}{0,4053}$$

U_{cp} — средняя скорость течения.

Рассматривая пару вихрей, Милович [26] приводит теорему Н. Е. Жуковского: количество движения, сообщаемое безграничной массе жидкости парой вращающихся в противоположные стороны параллельных, прямолинейных вихрей равного напряжения, равно плотности жидкости, умноженной на циркуляцию вихрей и расстояние между ними.

$$P = -\rho \Gamma l \quad (16)$$

Количество движения направлено нормально к прямой соединяющей вихри.

Это секундное количество движения, направленное вниз, и есть сила, которая приводит к отрыву частиц от слоя шуги. Оторванные частицы переносятся вниз по течению.

Циркуляция вихря равна

$$\Gamma = 2\pi r v \quad (17)$$

Подставляя в (16) из (14), (15) и (17), получим

$$P = -2,2 \pi \rho l u^2_{cp} \sqrt{1,21(4 \sin^2 \frac{\pi}{2a} y + \sin^2 \frac{\pi}{a} r)} \quad (18)$$

Для вихря, имеющего размеры $2r=h$, где h — глубина потока, и для случая максимальной интенсивности его при $a=b$ получим для P следующее выражение

$$P = 3,9 \pi h^2 \rho u^2_{cp} \quad (19)$$

Теперь можно перейти к оценке взаимодействия потока и шугового слоя. Очевидно, что шуговой слой будет устойчивым, если энергия расширения капиллярной пленки, связывающей между собой частицы, будет больше, чем энергия циркуляционного течения, определяемая работой силы P , вызванной циркуляцией пары вихрей. Из этого соотношения энергий легко можно получить предельную вели-

Примем начало координат на поверхности и ось h направленную вниз. Тогда на площадку размерами 1×1 будет действовать сила, равная

$$P = h (\gamma - \gamma_c) \quad a,$$

где γ — объемный вес воды, γ_c — по Ф-ле (9)

$$\gamma_c = \Delta(1 - \varepsilon),$$

где в свою очередь

Δ — удельный вес частиц,

ε — пористость.

Приращение толщины слоя на dh даст

$$p + dp = (h + dh)[\gamma - \Delta(1 - \varepsilon)]. \quad b,$$

Вычитая из в) а), получим

$$dp = dh[\gamma - \Delta(1 - \varepsilon)]. \quad c,$$

Можно допустить, как это делается в механике грунтов [21, 23], что

$$d\varepsilon = -a dp,$$

где a — коэффициент пропорциональности, аналогичный модулю упругости. Это предположение не подкреплено фактическими замерами, ввиду трудности их осуществления, но представляется достаточно вероятным, учитывая данные наблюдений, которые показывают, что шуговой слой до своего разрыва ведет себя как упругое тело. Поэтому в дальнейшем мы принимаем условно эту связь.

Величина a может быть определена из следующих соображений:

Коэффициент сжимаемости слоя шуги по аналогии с грунтовой массой может быть принят равным

$$a = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{p_2 - p_1}$$

для двух значений ε и p . По кривым распределения шуги значение a получено в среднем для ряда замеров равным $1-1,2 \text{ см}^2/\text{кг}$.

Для малых значений поверхностной концентрации a несколько снижается, доходя до $0,1 \text{ см}^2/\text{кг}$.

Тогда, не раскрывая значения коэффициента a , можно переписать в следующем виде

$$-\frac{a\varepsilon}{\gamma - \Delta + \Delta\varepsilon} = adh \quad \text{или}$$

$$-\frac{d\varepsilon}{\beta + \Delta\varepsilon} = adh \quad e,$$

где β — постоянная для данных плотностей воды и льда.

После интегрирования получим

$$-\frac{1}{\Delta} \ln(\beta + \Delta\varepsilon) = ah + c$$

Постоянная c определится из условия, что при $h=0$, т. е. на поверхности, $\varepsilon=\varepsilon_0$ (см. п. 2).

Тогда получим окончательно

$$\left(\frac{\beta + \Delta\varepsilon_0}{\beta + \Delta\varepsilon} \right)^{1/\Delta} = e^{ah} \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

или раскрывая

$$\varepsilon = \frac{1}{\Delta} \left[\frac{1}{e^{a\Delta h}} (\beta + \Delta\varepsilon_0) - \beta \right] \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

Сопоставление опытных кривых распределения шуги и расчетных дано на рис 7.

Замеры распределения шуги по сечению

В процессе работ на шуговой станции производились регулярные замеры распределения шуги по вертикали.

Скорости течения колебались от 1,2 до 1,8 м/сек в зависимости от расхода; замеры проводились в канале Ленинанканской ГЭС. Таким образом область измерения относилась к устойчивому движению шуговых пластов, характеризующему формулой (22). Измерение концентрации шуги в точке производилось „точечным шугомером“ [25]—вертикальным, подвижным цилиндром диам. 18 см с двумя неподвижными доньями. Взятие пробы приурочивалось к прохождению пласта шуги. В каждой точке проба бралась до 3-х и более раз до получения трехкратного совпадения концентрации с точностью до 5%. При анализе движения шуги необходимо постоянно иметь в виду, что поток шуги не континуум а дискретен и, потому все выводы относятся к условной картине сплошного движения.

Полученные кривые распределения означают, что так распределена шуга в пласте, независимо от величины пустых-промежутков между пластами.

Для характеристики „пульсации“ плотности шуговых слоев приведен ряд замеров в поверхностном слое потока.

Нечетные номера измерения в таблице 4—пласт, четные—прогал между пластами.

Таблица 4

№ № измерен.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Концен- трация	0,68	0,05	0,67	0,07	0,66	0,01	0,68	0,08	0,70	0,04	0,66	0,00	0,68	0,03	0,65	0,04

Таким образом в прогалах встречаются лишь случайные частицы. Обращает на себя внимание постоянство концентрации пласта.

В таблице 5 приведены характерные данные по замерам распределения шуги и по физическим константам шугового слоя, в соответствии с изложенным в предыдущих параграфах.

Таблица 5.

Характеристика распределения шуги в потоке

	№ по порядку	Расход воды, м ³ /сек	Глубина, м	Средняя скорость, м/сек	Максимальная скорость, м/сек	Толщина слоя шуги, м	Средняя концентрация, %	Расход шуги	$\frac{a}{\text{кг}}$	Коэффициент
+	1	2,76	1,23	1,0	1,35	0,37	70	0,25	2	0,7
	2	2,70	1,23	1,0	1,35	0,30	60	0,17	3	0,5
	3	3,14	1,0	1,40	1,6	0,45	75	0,32	1	0,6
	4	3,55	1,12	1,50	1,70	0,35	50	0,09	6	0,25
+	5	3,82	1,15	1,50	1,70	0,30	40	0,17	10	0,45
	6	5,92	1,53	1,75	1,95	0,35	45	0,31	11	0,55
+	7	4,28	1,54	1,70	1,90	0,6	70	0,82	2	0,30
	8	5,90	1,53	1,75	1,95	0,20	80	0,05	1	0,20
+	9	3,30	0,95	1,60	1,70	0,55	45	0,57	11	0,70
	10	4,07	1,13	1,70	1,75	0,45	60	0,60	10	0,7
	11	3,30	1,02	1,50	1,60	0,45	30	0,21	20	0,40
	12	3,16	0,93	1,40	1,55	0,40	60	0,58	8	0,7
	13	3,35	1,10	1,52	1,63	0,50	70	0,72	2	0,8
	14	5,12	1,43	1,76	1,84	0,50	70	0,81	2	0,8
	15	5,00	1,40	1,72	1,81	0,3	60	0,24	3	0,4

+ отмечены случаи, нанесенные на рис. 6.

Наиболее типичные кривые распределения по вертикали и изолинии концентрации даны на рис. 6.

Подсчет параметра a проведен для точек на глубине $y=0,2h$ и $y=0,4h$, для всех кривых, и в таблице дан средний для всех вертикалей, при данном расходе и средней концентрации.

На рис. 6 нанесены также теоретические кривые распределения, подсчитанные по формуле (22), по фактическому значению a .

Коэффициент a , который представляет собой величину обратную модулю упругости, как и следовало ожидать, меняется в зависимости от концентрации, увеличиваясь с уменьшением ϵ (рис. 5).

Модуль упругости шугового слоя составляет для небольшой концентрации $E=1 \text{ кг/см}^2$, что дает примерную величину допуска-

емого напряжения порядка $\sigma = 0,001 \text{ кг/см}^2$.^{*} Для частиц крупностью от 1 до 2 мм, какие мы встречаем в потоке, сила поверхностного натяжения составит $0,00075-0,0015 \text{ кг/см}^2$. Это совпадение не случайно и показывает, что наша предпосылка о доминирующем влиянии сил поверхностного натяжения в слое шуги правильна.

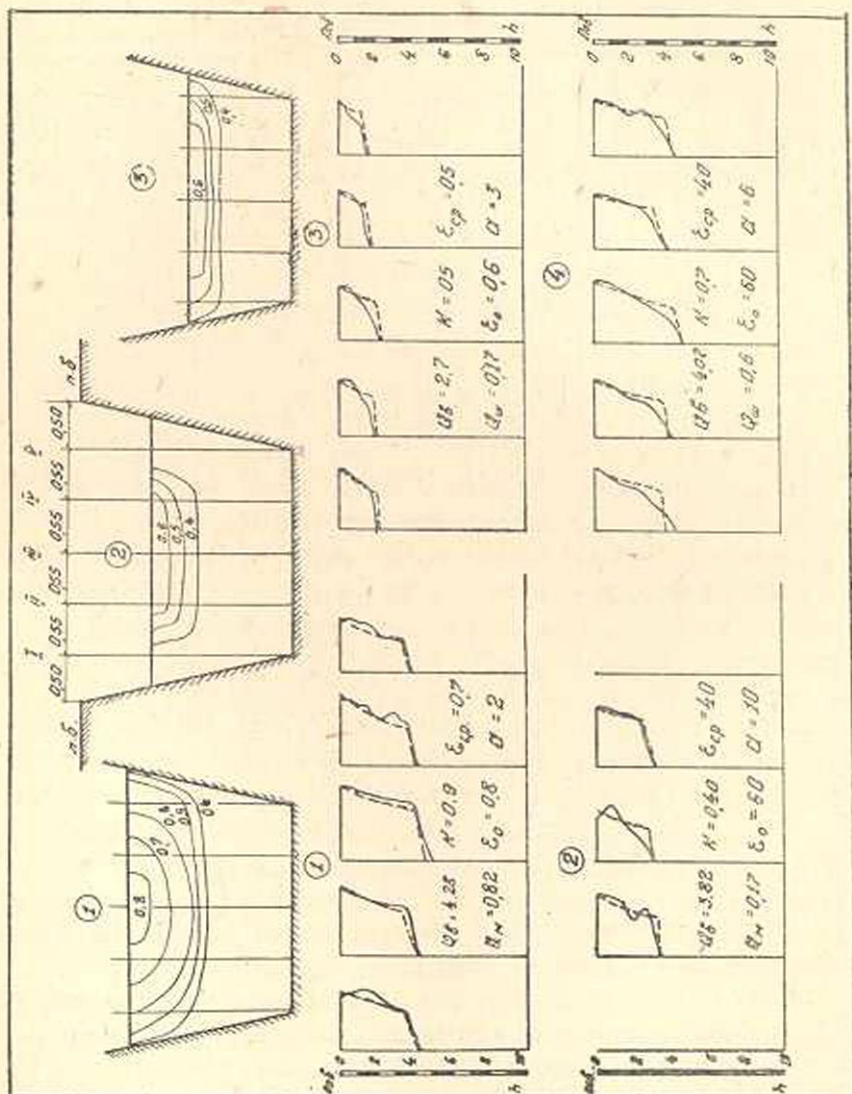


Рис. 6

Кривые распределения шуги по вертикали (рис. 6) дают близкое совпадение замеренных и теоретических, с очевидными отклонениями из-за некоторой неточности измерений. В частности отклонения наблюдаются в нижней части слоя из-за того, что при взятии пос-

^{*} Для получения соотношения между E и σ мы воспользовались данными, приведенными у Вейнберга [26] по физическим свойствам льда и снега.

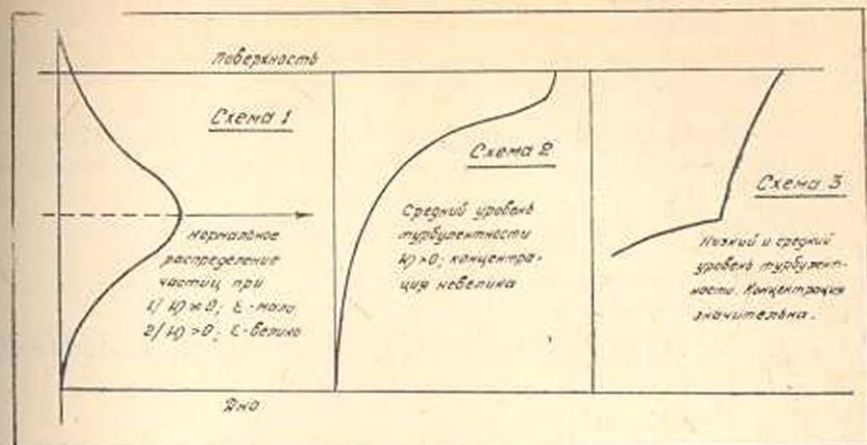


Рис. 7

ледней пробы толщина неизмеренного слоя составляет лишь часть габарита шугомера и потому, распространяя захваченное количество шуги на всю пробу, получается преуменьшенная концентрация. Поэтому на всех кривых показана точка фактической концентрации и отмечена граница шугового слоя по приведенной концентрации.

Водно-энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 10 I 1949

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Я. Вартазаров—Внутриводный лед в горных реках. Тр. Эв. Сектора АН Груз. ССР, т. 1, 1941 г.
2. С. Я. Вартазаров—Ледовый режим рек Армении. Изв. АН Армянской ССР (ест. науки), № 8, 1940.
3. С. Я. Вартазаров—Распределение внутриводного льда в потоке Тр. Эв. сект. АН Груз. ССР, т. 1, 1941.
4. O. Devik—Thermische u. dynamische Bedingungen der Eisbildung... Tekn. Tidsk. 1932.
5. Lüscher—Das Grundeis. Aarau, 1924.
6. П. И. Глинка—Исследование зимнего режима р. Чирчик (Архив Лед. ГИДЭП-а) 1938.
7. В. М. Макавеев, И. М. Конозлов—Гидравлика, 1940.
8. М. А. Великанов—Динамика русловых потоков, 1944.
9. A. Kalinske—Relation of the statistical theory of turbulence to hydraulics, Proc. Am. S. C. E. № 8, 1939.
10. V. Bjerkness—Vorlesungen über dynamische Fernkräfte, Leipzig, 1902.
11. Г. Ламб—Гидравлика, 1947.
12. В. В. Шулейкин—Физика моря, 1948.
13. T. R. Camp—Sedimentation and the design of settling basins. Pr. A. S. C. E. № 4, 1945.
14. Б. А. Фидман—Изв. АН СССР (серия геоф.), № 3, 1948.
15. М. А. Великанов—Движение наносов, 1948.

16. Лосиловский—Лабораторные исследования процессов образования перекатов 1934.
17. М. В. Потапов—Сборник ВНИИГ в М., 1934.
18. М. В. Потапов—Регулирование водных потоков методом искусственной донечной циркуляции, 1947.
19. J. Leighly—Turbulence and transportation of rock debris, Geogr. Review, 1932.
20. И. М. Копылов—Движение плавающих тел в потоке. Тр. Балт. конференции, 1933.
21. Цитович—Основы механики грунтов, 1936.
22. Попов—Механика грунтов, 1937.
23. K. Terzaghi—The theoretical soil mechanics, 1945.
24. Покровский—Силы сцепления в грунтах, 1933.
25. С. Я. Вартазаров—Методы количественного учета шуги. Мет. и Изд. № 9, 1939.
26. Б. Н. Вейнберг—Лед, 1948.

Ս. ՅԱՎԱՐԳԱԶԱՐՈՎ

ՀՈՍԱՆՔԻ ՄԵՋ ՆԵՐՋՐՅԱ ՍԱՌՈՒՅՑԻ ՇԱՐԺՈՒՄԸ

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Հսկվածում շարժվում են Ախարյանի դեռի վրա եղած սղինային կայանում հեղինակի կատարած մի քանի հետազոտությունների արդյունքները: Հետազոտության նպատակն էր հասանքի մեջ սղինի մասնիկների շարժումը բնորոշող հաշվային կախումների ստացումը:

Դիտարկվում են սահմանված է, որ սղինի շարժման մեջ կարելի է նշել երեք ստադիա՝ 1. զեն չձեռնարկված ստադիայի մանր բյուրեղների շարժում, որոնք հավասարաչափ տարածված են հոսանքի բնդայնական հատվածքում, 2. Փոքր խտության և օտարաբյուրեղյա թափուկ մակերգակի գեպրում խոշոր մասնիկների շարժում և 3. մասնիկների զգալի հիդրավիկական խոշորության գեպրում սղինի շարժում՝ հոսանքի մակերևույթի վրայով: Վերջին գեպրի համար հեղինակը գուրս է բերել բանաձև (22), որը տալիս է սղինի տարածման բնային բառ բարձրության:

Սահմանված է, որ սղինային շերտերի շարժման կայանությունը որոշվում է սղինի մասնիկների փոխադրվելու ռեկորդ և սղինի շերտի վրա հոսանքի ազդեցությամբ սղինային շերտի կապակցությունն ապահովող ուժեր են հանդիսանում մաղակաշունչի ռեկորդ: Սղինային շերտի և ջրով հագեցած գրունտի միջև անալոգիա անցկացնելով գուրս է բերվում հարակցական ուժերի համար բանաձև:

Սղինային շերտը քայքայվում է հոսանքի բնդայնական շրջանառության ազդեցության տակ: Զույգ պոտենցիալը իրար դեմ հանդիման պարավելիս սակզմում է մի ուժ, որը քայքայում է սղինի շերտը:

Սղինային շերտում հարակցական ուժերի և սղինային ուժերի հանդիման հարաբերությունները նշելով գուրս է բերվում շերտի կայան շարժման սահմանային արագության համար բանաձև (25):

Հսկվածում բերվում է սղինային կայանում կատարված հսկվածում սղինի տարածման չափումների տվյալները և հեղինակի բանաձևեր սղինի հիդրավիկական խոշորության կախումը տրամադրելու:

ГИДРОТЕХНИКА

А. М. Мхитарян

Фильтрация воды через земляные плотины на непроницаемых основаниях (частный случай)

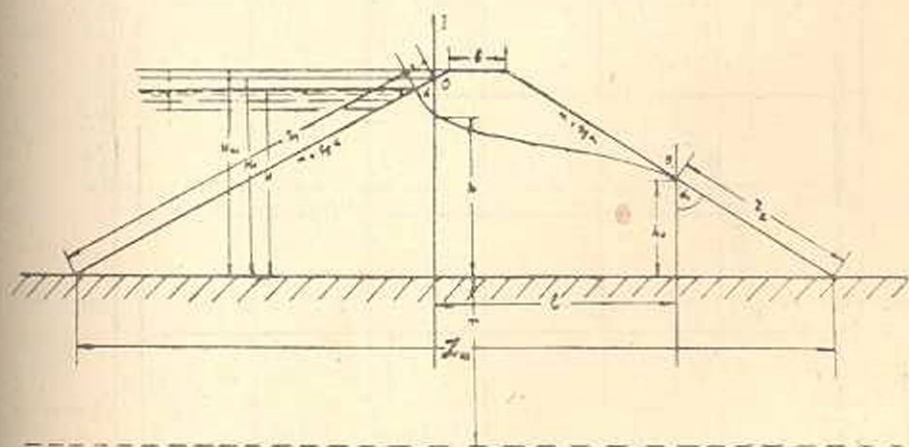
Для решения задач о фильтрации воды через земляные плотины с непроницаемым основанием [$T=0$] и с основанием неопределенно большой мощности [$T=\infty$] приведенные в нашей предыдущей работе [5] графики непригодны, т. к. их компоненты при $T=0$ и $T=\infty$ становятся не определенными. Поэтому общие уравнения для плотин с проницаемым основанием из упомянутой нашей работы перепишем и вместо значения T поставим 0 или ∞ .

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h_0}{g_1} \ln \frac{1,1 H + T}{1,1 H - h_0} \quad (1)$$

$$\frac{q}{k} \cdot l = T(h - h_0) + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad (2)$$

$$\frac{q}{k} = (T + h_0) \frac{\cos \alpha_1}{g_2} \quad (3)$$

$$l = l_{\text{пл.}} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad (4)$$



Черт. 1.

где $g_1 = 2\pi \frac{z}{360^\circ}$, $g_2 = 2\pi \frac{z_1}{360^\circ}$, q — расход, а k — коэффициент фильтрации.

Остальные обозначения см. чертеж 1.

Подставим значение l из уравнения [4] в уравнение [2] и полагая, что $T=0$, получим:

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} l_0 \frac{1,1H}{1,1H-h} \quad (5)$$

$$\frac{q}{k} (L_{0a} - 1,1mH - m_1h_0) = \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad (6) \quad \Pi,$$

$$\frac{q}{k} = A \cdot h_0 \quad (7)$$

График

Для определения входной ординаты $h=x'H$

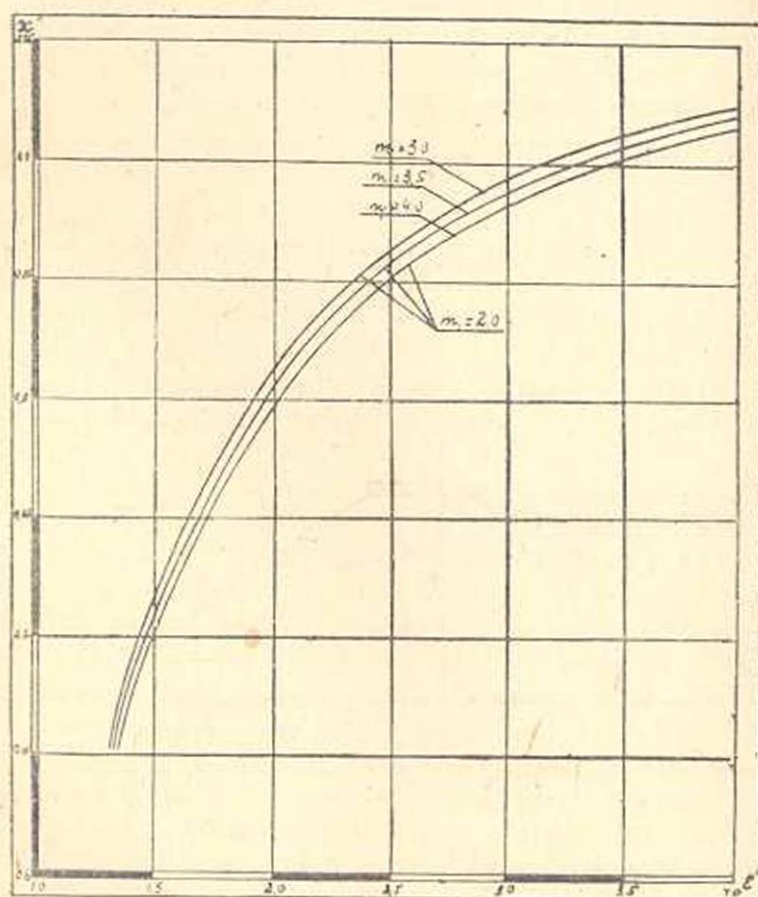


График 1-а

где $A = \frac{\cos \alpha_1}{g_2}$

Выразим компоненты расчета в долях от напора H , введя обозначения

$$\frac{q}{k} = Q', \quad \frac{h}{H} = x'', \quad \frac{h_0}{H} = y'', \quad \frac{1,1 \text{ мН} - 1,1 \text{ мН}}{H} = \varepsilon'.$$

Подставив новые переменные в систему II, получим преобразованную систему:

$$\left. \begin{aligned} Q' &= \frac{1 - x''}{g_1} \cdot \ln \frac{1,1}{1,1 - x''} \dots \dots \dots (8) \\ Q'(\varepsilon' - m_1 y'') &= \frac{x''^2 - y''^2}{2} \dots \dots \dots (9) \\ Q' &= A \cdot y'' \dots \dots \dots (10) \end{aligned} \right\} \text{III}$$

Эту систему не трудно привести к виду:

$$\left. \begin{aligned} y'' &= \frac{1 - x''}{g_1 A} \cdot \ln \frac{1,1}{1,1 - x''} \dots \dots \dots (11) \\ \varepsilon' &= \frac{x''^2 - y''^2}{2Ay''} + m_1 y'' \dots \dots \dots (12) \end{aligned} \right\} \text{IV}$$

График

Для определения безразмерной величины $h_0 = y''H$

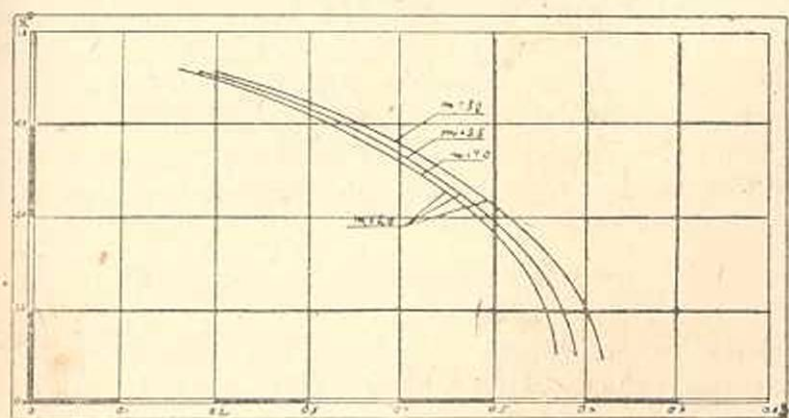


График 1-6

По этим уравнениям можно составить таблицы или графики для определения элементов кривой депрессии. Для определенных величин откосов, задаваясь значениями x'' (в пределах от 0,65 до 0,95) по уравнению [11], мы вычислили y'' , что позволяет найти ε' по уравнению [12].

Таким образом, для стандартных откосов расчетное соотношение может быть представлено одной кривой $x'' = f(\varepsilon')$, что позволяет на одном графике свести расчетные кривые для всех возможных типов профилей. Если каков-либо профиль на этом графике окажется случайно не предусмотренным, то величину x'' всегда можно будет определить по интерполяции между соседними кривыми, имеющими

постоянное значение одного и различные значения другого откоса. Для определения выходной ординаты можно составить другой график с кривыми:

$$y'' = f(\varepsilon') \text{ или } y'' = f(x'').$$

Чтобы не перегружать нашу статью табличным и графическим материалами, мы приведем график для низового откоса только $m_1=2$ и верхового $m=3,5$ и $m=4$.

Таблица для определения элементов кривой депрессии, при $m_1=2$

x''	$m=3$		$m=3,5$		$m=4$	
	ε'	y''	ε'	y''	ε'	y''
0,65	1,316	0,6200	1,3290	0,5990	1,3405	0,584
0,70	1,467	0,6015	1,4860	0,5815	1,502	0,567
0,75	1,659	0,5675	1,687	0,549	1,710	0,5845
0,80	1,9305	0,5150	1,970	0,498	2,0025	0,485
0,85	2,3660	0,4405	2,425	0,426	2,472	0,415
0,90	3,2245	0,3380	3,318	0,327	3,392	0,318
0,95	5,8050	0,1975	5,999	0,191	6,146	0,186

По таблицам значений ε' и y'' для $m=3$ и $m_1=2$ построены график и № 1^а и 1^б.

Приведем несколько примеров расчета.

Пример 1. Определить элементы кривой депрессии в плотине с напором $H=10$ м откосами $m_1=2$ и $m=3$, имеющей ширину по низу 63 м (исходя из высоты 11,5 м и ширины по гребню 5,5 м). Определим параметр ε'

$$\varepsilon' = \frac{L_{на}}{H} = 1,1 \text{ м} = \frac{63}{10} = 1,1 \cdot 3 = 3.$$

По графику 1-а находим $x''=0,8905$ и по графику 1-б $y''=0,36$. Следовательно входная ордината $h=x'' \cdot H=0,8905 \cdot 10=8,905$ м и выходная ордината $h_0=y'' \cdot H=0,36 \cdot 10=3,6$ м.

Расчет, как видим, элементарно прост.

Пример 2. Для тех же данных рассчитать расход, при условии, что коэффициент фильтрации равен 0,005 см/сек. или $K=0,000005$ м/сек.

Поэтому $Q' = A \cdot y'' = 0,464 \cdot 0,36 = 0,1454$, где $A = \frac{\cos \alpha_2}{g_2} = 0,464^*$

Следовательно $q = K H Q' = 0,000005 \cdot 10 \cdot 0,1454$

$$q = 0,00000727 \text{ м}^3 \text{ сек. на п. м.}$$

или $q = 0,00727$ л/сек. = 26, 1 л/час на п. м.

* Значение A для разных откосов можно взять из готовой таблицы нашей работы [5], на стр. 53, табл. № 3.

Пример 3. Рассчитать кривую депрессии по данным примера 1-го, но при условии $m = 4$ и в соответствии с этим $L_{\text{пл}} = 63 + 11,5 \cdot (4 - 3) = 74,5$.

По предыдущему $z' = \frac{74,5}{10} - 1,1 \cdot 4 = 3,05$,

по графикам $x'' = 0,8855$ и $y'' = 0,35$,

или $h = x''H = 8,855$ м $h_0 = y'' \cdot H = 0,35 \cdot 10 = 3,5$ м.

Сопоставляя друг с другом расчеты № 1 и 3, можно видеть, что влияние на движение заложения верхового откоса весьма незначительное, что хорошо согласуется со всем сказанным в нашей [5] о том, что фильтрационный поток не захватывает нижнюю часть верхового каньона, которая возрастает пропорционально с проницаемым слоем T .

Что касается случая при $T = \infty$, то мы надеемся вернуться к этому вопросу позже, после окончания лабораторных опытов в Гидроэлектрической лаборатории Академии Наук Арм. ССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Павловский—О фильтрации воды через земляную плотину на непроницаемом основании, 1931. Москва.
2. А. А. Угиртис—Расчет фильтрации через земляные пластины, 1940. Москва.
3. Ф. Б. Нельсон-Скорняков—Движение воды в однородной среде 1947. Москва.
4. Н. А. Шанкин—Расчет фильтрации в земляных плотинах, 1947. Москва.
5. А. М. Мхитарян—Фильтрация воды через земляные пластины на проницаемых основаниях. Изв. АН Арм. ССР, № 5, 1947.
6. А. М. Мхитарян—Фильтрация воды через земляные пластины на проницаемых основаниях с водой на п. б. Изв. АН Арм. ССР, № 4, 1948.

Поступило 9 IV 1949

Ա. Մ. Մխիթարյան

ՋՐԻ ՖԻԼՏՐԱՑԻԱՆ ՋՐԱՆՔԱՓԱՆՑ ՀԻՄՔԵՐԻ ՎՐԱ ԳՏՆՎՈՂ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ՄԱՐՄՈՎ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հսկվածում լուծարանիված է ջրանիւթափանց հիմքի վրա գտնվող պատվարների մարմնով կառավարվող ֆիլտրացիայի հաշվարկը հիդրավիկ մեթոդով, որը համարվում է մեր նախորդ աշխատանքի* մասնավոր դեպքը:

Քանի որ նախորդ աշխատանքը (ինչպես ցույց է արված նրա ամփոփման մեջ) ավելի ընդհանուր է և ճիշտ, քան մինչ այդ լույս առած (որոնց թվում ահազ. Պավլովսկու և պրոֆ. Ալգինչուսի) աշխատանքները

* Фильтрация воды через земляные пластины на проницаемых основаниях. Известия АН Арм. ССР, № 5, 1947 г.

հիղրավիկ մեթոդով, տպա նրա մասնավոր գեղարք ևս կարևոր է և պրակտիկայում կիրառելի:

Չնայած ստացված քանակների պարզությունը, լուծումը տրված է նամպրաֆիկ եղանակով՝ օգտագործումն ավելի հեշտապնակու համար:

Բերված օրինակները ցույց են տալիս ավյալ մեթոդի լուծման սահմանային հեշտությունը:

