ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ ЕРЕВАН

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

ГИДРАВЛИКА

Н. К. ИОАННИСЯН

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА ПРИ ЗАКРЫТИИ В КОНЦЕ ТРУБОПРОВОДА

При развитии объединенной энергосистемы и проектировании межсистемной линии электропередачи, задача автоматического регулирования и обеспечения динамической устойчивости системы требует более точного учета влияния гидравлического удара в напорной системе трубопровод-турбина на поведение гидроагрегатов при переходных процессах [1].

В случае больших возмущений электромеханические переходные процессы становятся зависимыми от характеристики гидротурбины, от явления гидравлического удара [2], которые значительно осложняют протекание процессов, делая их неподдающимися аналитическим расчетам. Поэтому основным путем изучения поведения гидротурбины при нестационарных режимах является метод моделирования физических процессов, происходящих в гидравлической части энергосистемы [1], при помощи которого на динамической модели воспроизводится совокупность всех явлений переходного процесса.

Такое моделирование позволяет выявить основные закономерности переходного процесса гидравлической части системы, как-то: моментные, расходные и оборотные характеристики гидротурбин с учетом влияния гидравлического удара [3], и разработать общую методику для аналитического расчета переходного процесса путем сочетания динамической модели со счетно-решающей машиной.

Для использования указанных машин, наряду с уравнением, описывающим физические процессы в отдельных звеньях и узлах системы, необходимо иметь выражение для гидравлического удара, непрерывного по времени, чтобы можно было их решать совместно.

Как известно дифференциальные уравнения упругого гидравлического удара, выведенные Н. Е. Жуковским [4], имеют вид:

$$g\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial t};$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{g}{a^2}\frac{\partial H}{\partial t}, \qquad (1)$$

где v — скорость потока в трубопроводе;

x — координата, отсчитываемая вдоль оси трубы;

a — скорость распространения гидравлического удара в трубопроводе;

g — ускорение силы тяжести;

H — напор установки.

Интегрирование волновых уравнений (1) при $a = \text{const}$ приводит к цепным уравнениям Аллиеви. Такое теоретическое решение гидравлического удара по Жуковскому-Аллиевы [5], хотя отличается большим совершенством и изяществом и очень точно воспроизводит действительное явление, ведется пофазно (целой или дробной) с использованием цепных уравнений, т. е. не дает непрерывного во времени решения.

В настоящей статье делается попытка получить непрерывную связь между давлением в трубопроводе и скоростью течения или расходом, что дает возможность представить уравнение гидривлического удара непрерывным по времени.

Обозначим относительное изменение расхода $q = \frac{\Delta Q}{Q_0}$ и напора $h = \frac{\Delta H}{H_0}$, где индекс (0) относится к начальному режиму; тогда уравнения (1) примут вид:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{v_0}{gH_0}\frac{\partial q}{\partial t}$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{gH_0}{v_0 a}\frac{\partial h}{\partial t}. \tag{2}$$

Если напорный трубопровод начинается от бассейна с зеркалом, достаточно больших размеров и постоянным уровнем наполнения, то интегрирование уравнений (2), взятых в операционной форме, дает операторное уравнение [6—8]:

$$\frac{\bar{q}}{\bar{h}} = -\frac{gH_0}{v_0 a}\,\text{cth}\,\frac{P\mu}{2}, \tag{3}$$

где $\bar{q}(P, L) \doteqdot q(t, L)$; $\bar{h}(P, L) \doteqdot h(t, L)$; $\mu = \frac{2L}{a}$ — фаза колебания: L — длина трубопровода.

Так как
$$\text{cth}\,\frac{P\mu}{2} = \frac{1 + \frac{1}{2!}\left(\frac{P\mu}{2}\right)^2 + \frac{1}{4!}\left(\frac{P\mu}{2}\right)^4 + \cdots}{\frac{P\mu}{2} + \frac{1}{3!}\left(\frac{P\mu}{2}\right)^3 + \frac{1}{5!}\left(\frac{P\mu}{2}\right)^5 + \cdots}, \tag{4}$$

то подставляя значение $\text{cth}\frac{P\mu}{2}$ из (4) в (3) и отбрасывая все члены ряда, содержащие P в четвертой и более высокой степени, получим:

$$\bar{q} = -\frac{gH_0}{v_0 a} \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2!}\left(\frac{P\mu}{2}\right)^2}{1 + \frac{1}{3!}\left(\frac{P\mu}{2}\right)^2} \bar{h}. \qquad (5)$$

Применяя теорему умножения изображений, найдем:

$$q(t) = -\frac{1}{T_т}\int_0^t h(\tau)\,d\tau - \frac{2}{T_т}\int_0^t h(\tau)\left[\cos\frac{2\sqrt{6}}{\mu}(t-\tau)\right]d\tau. \qquad (6)$$

Здесь $T_т = \frac{v_0 L}{gH_0}$ — постоянная трубопровода. Трижды дифференцируя (6) по t, получим последовательно:

$$T_т\frac{dq}{dt} = -3h + \frac{4\sqrt{6}}{\mu}\int_0^t h(\tau)\left|\sin\frac{2\sqrt{6}}{\mu}(t-\tau)\right|d\tau, \qquad (7)$$

$$T_т\frac{d^2q}{dt^2} = -3\frac{dh}{dt} + \frac{48}{\mu^2}\int_0^t h(\tau)\left|\cos\frac{2\sqrt{6}}{\mu}(t-\tau)\right|d\tau, \qquad (8)$$

$$\mu^2 T_т\frac{d^3q}{dt^3} = -3\mu^2\frac{d^2h}{dt^2} - 24\,T_т\frac{dq}{dt} - 24\,h. \qquad (9)$$

Аналогичное уравнение (9), но в интегральной форме, приведено в [6]. Уравнение (9) является приближенным и в отличие от (1) есть обыкновенное дифференциальное уравнение 3-го порядка относительно h. Если $\mu = 0$, то из (9) получим уравнение жесткого удара:

$$T_т\frac{dq}{dt} = -h. \qquad (10)$$

Допуская при закрытии регулирующего органа турбины изменения расхода во времени по линейному закону (задача Мишо), т. е.

$$q = -\frac{t}{T_s}, \qquad (11)$$

где T_s — время полного закрытия регулирующего органа, получим решение уравнения (9) в виде:

$$h(t) = A\cos\frac{2\sqrt{2}}{\mu}t + B\sin\frac{2\sqrt{2}}{\mu}t + \sigma, \qquad (12)$$

где A и B — постоянные интегрирования;

$$\sigma = \frac{T_т}{T_s} = \frac{\rho}{\theta}; \quad \rho = \frac{av_0}{2gH_0}; \quad \theta = \frac{T_s}{\mu}.$$

При $t = 0$ из (8), (11) и (12) получим $A = -\sigma$; $B = 0$.

Для относительного изменения напора из (12) получим:

$$h = 2\sigma \sin^2 \frac{\sqrt{2}}{\mu} t, \tag{13}$$

откуда

$$h_{\max} = 2\sigma, \tag{14}$$

что является формулой Мишо для определения наибольшего повышения давления при закрытии.

Допустим, что изменения открытия направляющего аппарата во времени происходит по линейному закону (задача Аллиеви), т. е. при закрытии

$$\alpha = 1 - \frac{t}{T_s},$$

где α — относительная величина открытия.

Тогда для расхода при закрытии можно принять

$$1 + q = \left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\sqrt{1 + h}, \tag{15}$$

или, если отклонение напора в переходных процессах невелико, то

$$1 + q = \left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\left(1 + \frac{1}{2} h\right). \tag{16}$$

Подставляя (16) в (9), получим:

$$\frac{T_т}{2}\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\frac{d^3h}{dt^3} + 3\left(1 - \frac{T_т}{2T_s}\right)\frac{d^2h}{dt^2} +$$

$$+ \frac{12T_т}{\mu^2}\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\frac{dh}{dt} + \frac{24}{\mu^2}\left(1 - \frac{T_т}{2T_s}\right) h = \frac{24T_т}{\mu^2 T_s}, \tag{17}$$

что является дифференциальным уравнением гидравлического удара при линейном законе изменения открытия.

Частным решением уравнения (17) будет:

$$h_* = \frac{2\sigma}{2 - \sigma}. \tag{18}$$

Для решения однородного уравнения, т. е. уравнение (17) без правой части, сделаем подстановку

$$h = e^{\frac{c}{3}\tau} w(\tau); \quad e^{\tau} = 1 - \frac{t}{T_s}, \tag{19}$$

где

$$c = 3\left(\frac{2T_s}{T_т} - 1\right).$$

Тогда уравнение (17) без правой части примет вид:

$$\frac{d^3w}{dt^3} - 3\frac{d^2w}{d\tau^2} - \left(\frac{c^2 + 3c - 6}{3} - 3be^{2\tau}\right)\frac{dw}{d\tau} - \frac{2c(c^2 - 9)}{27} w = 0, \tag{20}$$

где $$b = 8\,\theta^2.$$

Так как $$e^{2\tau} = 1 + 2\tau + \frac{(2\tau)^2}{2!} + \cdots + \frac{(2\tau)^n}{n!} + \cdots,$$

то из уравнения (20) получаем:

$$\frac{d^3w}{d\tau^3} - 3\frac{d^2w}{d\tau^2} + (A_0 + A_1\tau + \cdots + A_n\tau^n + \cdots)\frac{dw}{d\tau} - kw = 0, \tag{21}$$

где $$k = \frac{2c\,(c^2-9)}{27}; \quad A_0 = 3b - \frac{c^2+3c-6}{3};$$

$$A_1 = \frac{2\cdot 3b}{1!}; \quad A_2 = \frac{2^2\cdot 3b}{2!}\cdots; \quad A_n = \frac{2^n\cdot 3b}{n!}\cdots$$

Ищем решение (21) в виде степенного ряда

$$w(\tau) = B_0 + B_1\tau + \cdots + B_n\tau^n + \cdots \tag{22}$$

Подставляя (22) и его 1-ые, 2-ые, 3-ие производные в (21) и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях τ, определим последовательно коэффициенты B_3, $B_4, \cdots$.

Вообще n-ый коэффициент ряда (22) определяется по формуле:

$$B_n = \frac{3}{n}B_{n-1} - \frac{A_0}{n(n-1)}B_{n-2} - \frac{(n-3)\,A_1 - k}{n\,(n-1)\,(n-2)}B_{n-3} -$$

$$- \frac{(n-4)\,A_2}{n\,(n-1)(n-2)}\cdot B_{n-4} - \frac{(n-5)\,A_3}{n\,(n-1)(n-2}B_{n-5} - \cdots \tag{23}$$

Правая часть (23) имеет $n-1$ членов, начиная с члена, содержащего B_{n-1} и кончая членом, содержащим B_1. Коэффициенты B_0, B_1, B_2 играют роль произвольных постоянных.

На основании (18—23) общее решение уравнения (17) будет

$$h\,(t) = \left(1 - \frac{t}{T_s}\right)^{\frac{c}{3}}\Bigg\{B_0 + B_1 e_n\left(1 - \frac{t}{T_s}\right) +$$

$$+ B_2\left[e_n\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\right]^2 + B_3\left[e_n\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\right]^3 + \tag{24}$$

$$+ \cdots + B_n\left[e_n\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)\right]^n + \cdots\Bigg\} + \frac{2\sigma}{2-\sigma}.$$

Произвольные постоянные интегрирования B_0, B_1, B_2 находятся из следующих условий:

1) при $t=0$ имеем $h\,(t)_{t=0} = 0$; (25)

поэтому из (7) находим;

$$\left(\frac{dq}{dt}\right)_{t=0} = 0. \tag{26}$$

2) Дифференцируя (16) по t и учитывая (26), получим:

$$\left(\frac{dh}{dt}\right)_{t=0}=\frac{2}{T_s}, \tag{27}$$

вследствии чего из (8) находим:

$$\left(\frac{d^2q}{dt^2}\right)_{t=0}=-\frac{6}{T_т\, T_s}. \tag{28}$$

3) Дважды дифференцируя (16) по t и учитывая (28), будем иметь:

$$\left(\frac{d^2h}{dt^2}\right)_{t=0}=\frac{4}{T_s}\left(\frac{1}{T_s}-\frac{3}{T_т}\right). \tag{29}$$

Три раза дифференцируя (24) по t и учитывая (25), (27) и (29), получим:

$$B_0=-\frac{2\sigma}{2-\sigma};\ B_1=0;\ \ B_2=-\frac{4}{\sigma}. \tag{30}$$

Подставляя значения B_0, B_1, и B_2 в (25), будем иметь:

$$h(t)=\left(1-\frac{t}{T_s}\right)^{\frac{c}{3}}\left\{-\frac{2\sigma}{2-\sigma}-\frac{4}{\sigma}\left[e_n\left(1-\frac{t}{T_s}\right)\right]^2+\right.$$

$$\left.+B_3\left[e_n\left(1-\frac{t}{T_s}\right)\right]^3+\cdots+B_n\left[e_n\left(1-\frac{t}{T_s}\right)\right]^n+\cdots\right\}+\frac{2\sigma}{2-\sigma}. \tag{31}$$

Когда $t\to T_s$, т. е. в конце закрытия,

$$h(t)_{t\to T_s}=h_{\text{пред.}}=\frac{2\sigma}{2-\sigma}, \tag{32}$$

что является формулой Де Спарра для предельного значения удара. При помощи выражения (31) можно вычислить значение гидравлического удара непрерывного для любого момента времени в случае закрытия направляющего аппарата турбины.

Если принимать $$2\,T_s-T_т=\mu, \tag{33}$$

то общее решение уравнения (17) будет:

$$h(t)=\left(1-\frac{t}{T_s}\right)^{\frac{c}{3}}\left\{B_0+B_1 e_n\left(1-\frac{t}{T_s}\right)+\cdots+B_n\left[e_n\left(1-\frac{t}{T_s}\right)\right]^n+\right.$$

$$\left.+\cdots\right\}+2\rho. \tag{34}$$

Так как обычно $T_т < T_s$, то из (33) следует, что $\mu \geqslant T_s$, т. е. полное закрытие происходит быстрее, чем отражается волна, тогда из (34) получим формулу Жуковского для прямого удара

$$h = 2\rho = \frac{v_0 a}{g H_0} \cdot \qquad (35)$$

Как известно, наибольшее повышение давления при сбросе нагрузки практически имеет место либо в конце первой фазы, либо в конце закрытия, что определяется предельной величиной удара. Из (31) видно, что максимальное повышение может происходить на конце закрытия ($t \to T_s$) и равно

$$h_{\max} = h\,(t)_{t \to T_s} = h_{\text{пред.}} = \frac{2\sigma}{2 - \sigma}, \qquad (36)$$

что является формулой Де Спарра для определения наибольшего повышения давления при $\rho > 1$.

Если максимальное повышение давления происходит не в конце закрытия, тогда аналитическое определение ее величины становится затруднительным. Однако многочисленные вычисления показывают, что и для этого случая значение наибольшего повышения давления по (31) так же совпадает с максимальным значением давления, вычисленным с помощью следующей формулы Де Спарра:

$$h_{\max} = h_1 = \frac{2\sigma}{1 + \rho - \sigma}, \qquad (37)$$

где h_1 — относительное изменение напора в первой фазе.

Для иллюстрации правильности полученной формулы (31) ниже приводятся два численных примера в случаях $\rho < 1$ и $\rho > 1$.

Пример 1.

$$H_0 = 250\ \textit{м}; \quad L = 900\ \textit{м}; \quad a = 900\,\frac{\textit{м}}{\textit{сек}}$$

$$v_0 = 3\,\frac{\textit{м}}{\textit{сек}}; \ T_s = 6\ \textit{сек}.$$

По этим данным определим последовательно $h_{\text{пред.}} = 0{,}202$; $\sigma = 0{,}183$; K; A_0; $A_1; \cdots; A_n \cdots$, а затем по формуле (23) находим B_3; $B_4; \cdots$

Подставляя значения коэффициентов B_n ($n = 3, 4 \cdots$) в (31), получим величины изменения напора для каждого момента времени. Результаты расчетов изображены на рис. 1 (кривая 1). На этом же рисунке нанесены кривые 2 и 3, расчитанные соответственно по цепным уравнениям Аллиеви и по формуле жесткого удара.

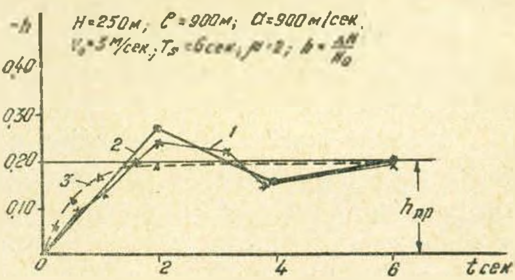


Рис. 1. Относительное изменение напора по времени (пример 1).

Как видно кривые 1 и 2 периодические и мало отличаются друг от друга, в то время как кривая (3) жесткого удара качественно отличается от них.

Пример 2.

$$H_0=50\ м;\ L=245\ м;\ v_0=1{,}5\ \frac{м}{сек};\ a=981\ \frac{м}{сек};$$

$T_s=2$ *сек*. При этих данных получим $\rho=1{,}5$.

Аналогично предыдущему примеру находим все искомые величины, а результаты нанесены на рис. 2 (кривая 1). Так как здесь $\rho>1$, то

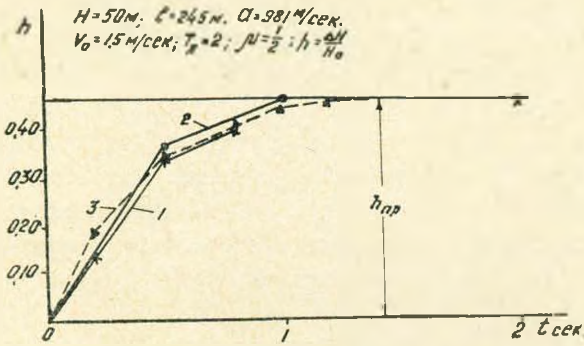


Рис. 2. Относительное изменение напора по времени (пример 2).

кривая удара апериодическая (рис. 2—кривая 1). На этом же рис. 2 нанесены кривые 2 и 3, вычисленные соответственно по цепным уравнениям Аллиеви и по формуле жесткого удара. Все эти кривые апериодические и $h_{max}=h_{пред.}=0{,}46$.

Из рис. 1—2 явствует, что результаты расчетов по (31) с достаточной для практики точностью совпадают с результатами расчетов по цепным уравнениям Аллиеви.

Так как из (31) для $t\to T_s$ вытекает формула Де Спарра (36) для h_{max}, то она отвечает всем точкам на абаке Аллиеви [9] (рис. 3), находящимся в зоне $\rho>1$, где $\xi^2=1+h$.

В зонах же $\rho<1$ указанной абаки нанесены точки, полученные по расчету формулой (31). Результаты этих расчетов и соответсвенные значения по абаке показаны в табл. 1.

Из этих сопоставлений видно, что максимальные значения удара по расчетной формуле (31) и по основной абаке Аллиеви совпадают. Есть небольшое расхождение в фазе, в которой происходит максимальное повышение, что объясняется точностью проведенных расчетов.

Таким образом, из обыкновенного дифференциального уравнения получаются все классические частные случаи—формулы жесткого и прямого ударов, предельное значение удара по Де Спарра, задачи Мишо и Аллиеви.

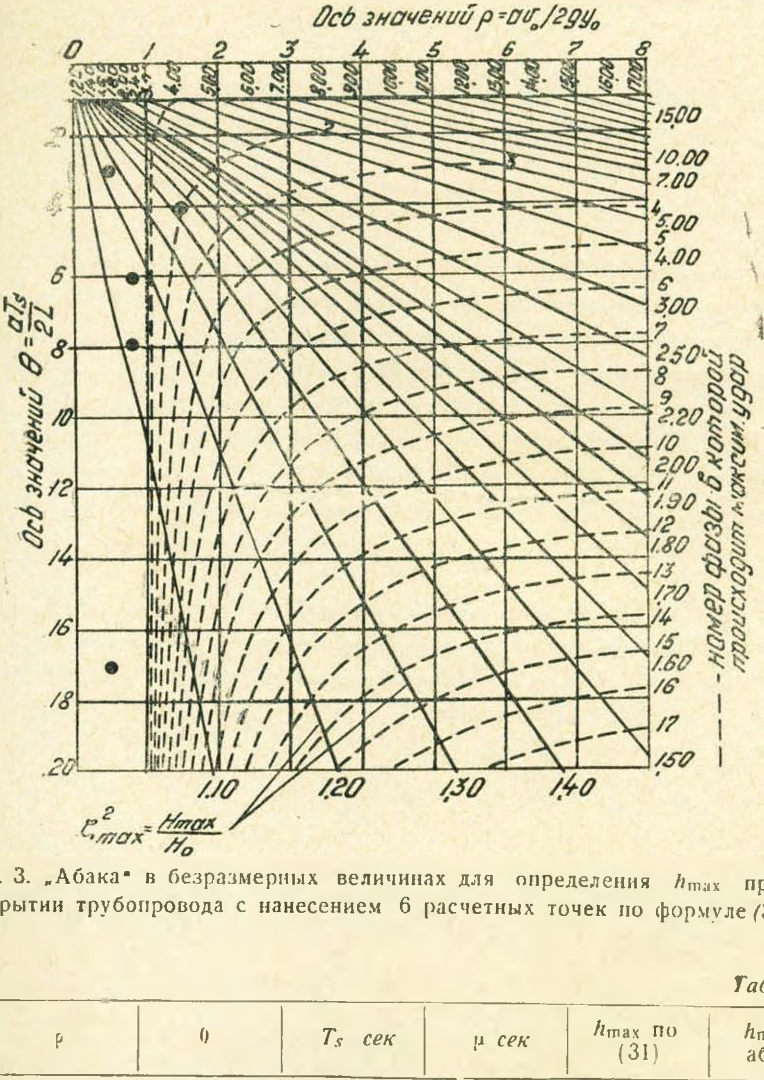


Рис. 3. „Абака" в безразмерных величинах для определения h_{max} при закрытии трубопровода с нанесением 6 расчетных точек по формуле (31).

Таблица 1

№№ п/п	ρ	θ	T_s *сек*	μ *сек*	h_{max} по (31)	h_{max} по абаке
1	0,55	3	6	2,0	0,24	0,26
2	1,50	4	2	0,5	0,46	0,46
3	0,80	6	3	0,5	0,16	0,16
4	1,00	10	10	1,0	0,11	0,11
5	0,51	17	6	0,35	0,03	0,04
6	0,72	8	4	0,50	0,11	0,11

Этот анализ показывает, что уравнение (9) можно считать эквивалентным системе уравнений упругого гидравлического удара (1) и может быть использовано как для расчетов, так и для аналитических исследований.

Институт энергетики и гидравлики
АН АрмССР

Поступило 16.XII 1960

Ն. Կ. ԻՈԱՆՆԻՍՅԱՆ

ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐՎԱԾԻ ՀԱՎԱՍԱՐՄԱՆ ԱՆԱԼԻՏԻԿ ԱՐՏԱՀԱՅՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՃՆՇՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԻ ԾԱՅՐԸ ՓԱԿԵԼԻՍ

Ամփոփում

Ինչպես հայտնի է, հիդրավլիկական առաձգական հարվածի տեսական լուծումը ըստ Ժուկովսկու-Ալլիևի չնայած կատարյալ է ու լրիվ արտահայտում է երևույթը, սակայն լուծվում է ըստ ֆազաների (ամբողջ կամ կոտորակային)։

Հոդվածում խողովակաշարի ճնշման ու ելքի փոփոխության միջև եղած կախումն արտահայտվում է սովորական 3-րդ կարգի դիֆֆերենցիալ հավասարման (9) միջոցով, որից ստացվում է հիդրավլիկական հարվածի հավասարման (31) անալիտիկ արտահայտությունը՝ ըստ ժամանակի անընդհատ կապի տեսքով, երբ ճնշման խողովակաշարի ծայրի փակում է տեղի ունենում։

(9) հավասարումից ստացվում է հիդրավլիկական հարվածի կլասիկ դեպքերը։

(31) բանաձևով հաշվումները և նրանց համեմատումը Ալլիևի շղթայական հավասարումներով հաշված արդյունքների հետ ցույց են տալիս, որ (9) հավասարումը կարելի է համարել համարժեք առաձգական հարվածի հավասարումների (4) սիստեմին և օգտագործել ինչպես հաշվումների, այնպես էլ անալիտիկ հետազոտությունների ժամանակ։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егиазаров И. В.* Задачи научных исследований по изучению работы гидроэнергосистем и их автоматического регулирования. „Известия АН Армянской ССР", сер. ФМЕТН, № 1, 1953.
2. *Картвелишвили Н. А.* Влияние взаимодействия гидравлических, механических и электрических процессов на устойчивость работы электростанций. Изв. ОТН СССР, № 2, 1958.
3. *Буниатян Б. Л.* Моделирование гидротурбин при переходных процессах „Известия АН Армянской ССР" (сер. техн. н.), № 1, 1960.
4. *Жуковский Н. Е.* О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Госиздат, М.—Л., 1949.
5. *Егиазаров И. В.* Гидравлические силовые установки. Т. III, ОНТИ, НКТП СССР, 1947.
6. *Картвелишвили Н. А.* Устойчивость в малом динамических систем, содержащих малые параметры. Известия ОТН АН СССР, № 9, 1957.
7. Под редакцией акад. *Костенко М. П.* Электродинамическое моделирование энергетических систем. Издат. АН СССР, М.—Л., 19[illegible]9.
8. *Воронов А. А., Первозванский А. А., Семенов В. В.* Электродинамическая модель гидравлической турбины и ее регулятора скорости. Изв. ОТН АН СССР, № 1, 1956.
9. *Мостков М. А.* Гидравлический удар в гидроэлектрических станциях, ГОНТИ, НКТП СССР, М.—Л., 1938.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г. Т. АДОНЦ, Ю. Г. ГРИГОРЬЯН, М. М. АДОНЦ

АЛГОРИТМ, ПРОГРАММА И ПРИМЕР РАСЧЕТА НА ВМДД РЕЖИМА ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ, СВЯЗАННОГО С ВЫБОРОМ СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ

Вопросы алгоритма, программирования и производства расчетов с помощью вычислительной машины дискретного действия (ВМДД) режимов энергосистем, дающих экономию топлива, приобретают все большее научное и практическое значения из-за ожидаемой эффективности внедрения в практику энергосистем таких режимов.

Состояние разработки этих задач в настоящее время таково, что необходимо накопить примеры построения алгоритмов, программ и их реализации на ВМДД для различных типовых энергосистем.

В настоящей статье предлагается алгоритм, программа и пример расчета с помощью машины М-3 режима экономии топлива для энергосистемы без гидростанций, связанного с задачей выбора рабочих генерирующих агрегатов (котлов и турбогенераторов) из числа имеющихся на станциях для каждого часа суточного графика нагрузок системы.

Параметры энергосистемы, использованные в примере расчета, приводятся в приложении 1.

Постановка задачи. Требуется:

1. Заданную активную нагрузку P_t энергосистемы за каждый t-ый час суток распределить между ее m тепловыми станциями так, чтобы для стационарных режимов станций $c = 1, 2, \cdots m$ получить минимум расхода топлива T_{ct}.

2. Определить такую комбинацию состояний на станциях в каждый час суток, чтобы расход топлива

$$T = \sum_{t=1}^{24} \sum_{c=1}^{m} [T_{ct} + T_{ck} + T_{\text{ст}}] \tag{1}$$

был бы минимальным, с учетом расходов топлива, связанных с остановами и пусками агрегатов. В формуле (1) принято; T_{ct} — топливо, расходуемое на каждой станции за t-ый час, в стационарных режимах;

$T_{\text{ст}}$ — пусковые расходы, связанные с остановом и пуском турбогенераторов для данного набора на станциях;

T_{ck} — пусковые расходы, связанные с остановом и пуском котлов для данного набора состояний на станциях.

Расчетные формулы. В процессе решения данной задачи, кроме (1), используются также следующие расчетные формулы:

а) Критерий равенства относительных приростов и баланса мощностей

$$\varepsilon_{1s_1j} = \varepsilon_{2s_2j} = \varepsilon_{3s_3j} = \dots = \varepsilon_{ms_mj} \qquad (2)$$

$$P_{1s_1j} + P_{2s_2j} + P_{5s_5j} + \dots + P_{ms_mj} = P_t, \qquad (3)$$

где ε_{cs_cj} — относительный прирост тонны условного топлива на единицу выработанной мощности для каждой из m тепловых станций, c — индекс станции, j — индекс режима работы этой станции, $s_1, s_2, \dots$ $\dots, s_m$ — индексы состояний соответствующих станций.

б) Условие покрытия нагрузки состояниями s

$$P_{\min}^{(s)} \leqslant P \leqslant P_{\max}^{(s)}, \qquad (4)$$

где s — индекс рассматриваемого в данный расчетный час набора состояний на станциях (т. е. индекс состояний данной системы)

$$s = \overline{1, N_0} \quad N_0 = \prod_{i=1}^{m} s_i$$

$P_{\min}^{(s)}$, $P_{\max}^{(s)}$ соответственно: минимальные и максимальные мощности энергосистемы для каждого сочетания состояний на тепловых станциях.

в) Условия для определения расчетного числа состояний.

Теоретически возможное число комбинаций состояний на каждый расчетный час t определяется произведением

$$N_0 = \prod_{i=1}^{m} s_i. \qquad (4a)$$

Число комбинаций состояний N_1, удовлетворяющее условию (4), будет меньше, в крайнем случае, равно числу N_0.

Так как расчет ведется методом последовательных приближений, то используются также следующие рекурентные формулы, аппроксимирующие характеристики станций:

$$P_{cs_c}^{(n)} = P_{cs_cj} + \frac{P_{cs_c(j+1)} - P_{cs_cj}}{\varepsilon_{cs_c(j+1)} - \varepsilon_{cs_cj}} \left(\varepsilon_{cs_c}^{(n)} - \varepsilon_{cs_cj}\right) \qquad (5)$$

$$T_{cs_cj}^{(n)} = T_{cs_cj} + \varepsilon_{cs_c}^{(n)} \left(P_{cs_cj}^{(n)} - P_{cs_cj}\right) \qquad (6)$$

$$\varepsilon_{cs_cj} \leqslant \varepsilon_{cs_c}^{(n)} \leqslant \varepsilon_{cs_c(j+1)}. \qquad (7)$$

Значения P_{cs_cj}, $P_{cs_c(j+1)}$, ε_{sc_cj}, $\varepsilon_{cs_c(j+1)}$, T_{cs_cj} приводятся в таблицах типа П 1—1, 2, 3 для каждого из m станций.

Кроме (1) ÷ (7) используются для расчета пусковых расходов формулы 7, 8, 9, 10, приведенные в статье Григорьяна Ю. Г. [3], помещенной в данном номере журнала.

Алгоритм решения задачи. Для решения задачи предлагается метод последовательных приближений.

1. Определяется число N_0 для каждого расчетного часа.

2. Из теоретически возможного числа состояний $N_0 = \prod_{i=1}^{m} s_i$ имеющегося на каждый расчетный час t, исключаются те сочетания состояний, которые не удовлетворяют хотя-бы одному из неравенств (4).

Очевидно, это число $N_1 \leqslant N_0$.

3. Выбираются значения $\varepsilon^{(k)}_{cs_c}$ для к-го приближения. Величина относительного прироста ε выбирается путем деления пополам интервала его изменений (ε_{min}, ε_{max}) одинакового для всех станций в любом состоянии.

Следовательно, в качестве первого приближени ε имеем

$$\varepsilon^{(1)}_{1s_1} = \varepsilon^{(1)}_{2s_2} = \varepsilon^{(1)}_{3s_3} = \cdots = \varepsilon^{(1)}_{ms_m} = \frac{\varepsilon_{min} + \varepsilon_{max}}{2} = \varepsilon_1,$$

что соответствует условию (2).

4. Находятся значения ε_{cs_cj}, $\varepsilon_{cs_c(j+1)}$ по неравенству (7), а следовательно и значения P_{cs_cj}, $P_{cs_c(j+1)}$ по данным таблиц типа П1—1, 2, 3.

Определяются по формулам (5) и (6) величины $P^{(1)}_{cs_c}$, $T^{(1)}_{cs_c}$

$$(c = \overline{1, m}); \ (s_1 = s^0_1, \ s_2 = s^0_2, \ \cdots s_m = s^0_m).$$

5. Суммируются величины $P^{(1)}_{cs^0_c}$ и сравниваются с общей нагрузкой P_t на данный расчетный час t.

6. Если
$$\left| \sum_{c=1}^{m} P^{(1)}_{sc^0_c} - P_t \right| > \delta, \tag{8}$$

где δ — заданная точность, то делается второе приближение к искомой величине ε. Для этого проверяется знак неравенств.

$$\sum_{c=1}^{m} P_{cs^0_c} \gtrless P_t. \tag{9}$$

Если в (9) имеет место знак $<$, то с целью увеличения $\sum_{c=1}^{m} P^0_{cs_c}$ берется большее значение ε так как зависимость P от ε является монотонно-возрастающей.

С этой целью делится пополам интервал (ε_1, ε_{max}) т. е. находится

$$\varepsilon^{(2)}_{1s^0_1} = \varepsilon^{(2)}_{2s^0_2} = \varepsilon^{(2)}_{3s^0_3} = \cdots = \varepsilon^{(2)}_{ms^0_m} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_{max}}{2} = \varepsilon_2 > \varepsilon_1.$$

Если же в (9) имеет место знак $>$, то находится

$$\varepsilon^{(2)}_{1s^0_1} = \varepsilon^{(2)}_{2s^0_2} = \varepsilon^{(2)}_{3s^0_3} = \cdots = \varepsilon^{(2)}_{ms^0_m} = \frac{\varepsilon_{\min} + \varepsilon_1}{2} = \varepsilon_2 < \varepsilon_1,$$

делением уже интервала ($\varepsilon_{\min}$ ε_1). В обоих случаях расчеты по пунктам 2 и 3 повторяются до достижения условия

$$\left| \sum_{c=1}^{m} P^{(k)}_{cs^0_c} - P_t \right| \leqslant \delta, \tag{10}$$

где k — порядок приближения, после чего вычисляется одно из слагаемых (1), а именно вычисляется величина $\sum\limits_{c=1}^{m} T^{(k)}_{cs^0_s}$.

7. Расчеты по пунктам 4, 5, 6 повторяются для всех остальных комбинаций состояний на станциях на каждый расчетный час t, т. е. для всех остальных N_t.

В результате, за расчетный час суток получается таблица распределения нагрузки P_t по станциям и расхода топлива T_{ct} ($c = 1, m$), приходящегося на каждую из станций. Определяется также топливо $\sum\limits_{c=1}^{m} T_{ct}$, расходуемое на систему в целом, для тех только состояний системы, для которых неравенство (4) выполняется. Полученные данные для каждого расчетного часа печатаются в таблице по признаку возрастания суммарного расхода топлива с целью определения той комбинации состояний на станциях на данный расчетный час, при которой имеется минимальный расход топлива.

8. Расчеты по пунктам 3, 4, 5, 6, 7 повторяются для всех часов суток, т. е. для $t = 1,24$.

9. По методу, описанному в [3] вычисляются пусковые расходы $\sum\limits_{c=1}^{m} [T_{\text{ст}} + T_{\text{ск}}]$ для:

а) наборов состояний на станциях, при которых в каждый час суток получается минимальный расход топлива;

б) наборов состояний на станциях, при которых в каждый час суток получается максимальный расход топлива.

Число вычислительных операций. Для реализации на ВМДД изложенного выше алгоритма оказывается необходимым выполнение следующего числа вычислительных операций

$$k \approx k_1 \sum_{t=1} N_t + \nu l_1 + 2k_2 + N_t l_2, \tag{11}$$

где $$k_1 \approx 3mnAn + n_1 [a_1 + m (a_2 + n_2 An_2)] + M;$$

N_t — число различных состояний, удовлетворяющих условию (4) при $t=\overline{1, \nu}$;

где ν — число различных нагрузок за сутки;

N_t — число различных состояний, неудовлетворяющих условию (4);

k_2 — число операций, необходимых для расчета пусковых расходов.

l_2 — число операций, необходимых для перехода к рассмотрению следующего набора состояний при невыполнении условия (4);

l_1 — число операций, необходимых для размещения вычисленных величин $\sum_{c=1}^{m} T_{cs_c}$ по возрастающей последовательности для каждого t;

m — число станций в энергосистеме;

n — число строк в таблицах П 1—1, 2, 3;

n_1 — число циклов для достижения условия (10);

n_2 — число циклов, необходимых для достижения условия

$$\varepsilon_{cs_c(j+1)} \geqslant \varepsilon_{cs_c j}^{(k)}$$

и нахождения величин $\varepsilon_{cs_c(j+1)}$, $\varepsilon_{cs_c j}$; $P_{cs_c(j+1)}$, $P_{cs_c j}$, $T_{cs_c j}$;

A_n и A_{n_2} — число операций, необходимых для реализации одного цикла соответственно по индексам n и n_2;

a_1 — число операций, необходимых для восстановления по индексу m;

a_2 — число операций, необходимых для восстановления по индексу n_2;

M — число операций вне циклов (операции восстановления и печати).

Пример расчета для одной энергосистемы. В качестве иллюстрации изложенного выше алгоритма приводится ниже пример расчета для одной энергосистемы, параметры которой приводятся в приложении 1.

А. Схема программы и функции ее операторов

$$R_\lambda^t \overset{11}{\downarrow} R_\Sigma^{i,\alpha} R_A^{i,\alpha} R_\lambda^s R_r^{s_2} \overset{10}{\downarrow} R_p^{s_1} \overset{9}{\downarrow} \lambda_{st} \overset{1}{\uparrow} R_{s_1} r_{s_2} M \overset{8}{\downarrow} R_\lambda^j R_\text{т}^c \overset{4}{\downarrow} R_D^n \overset{2}{\downarrow}$$

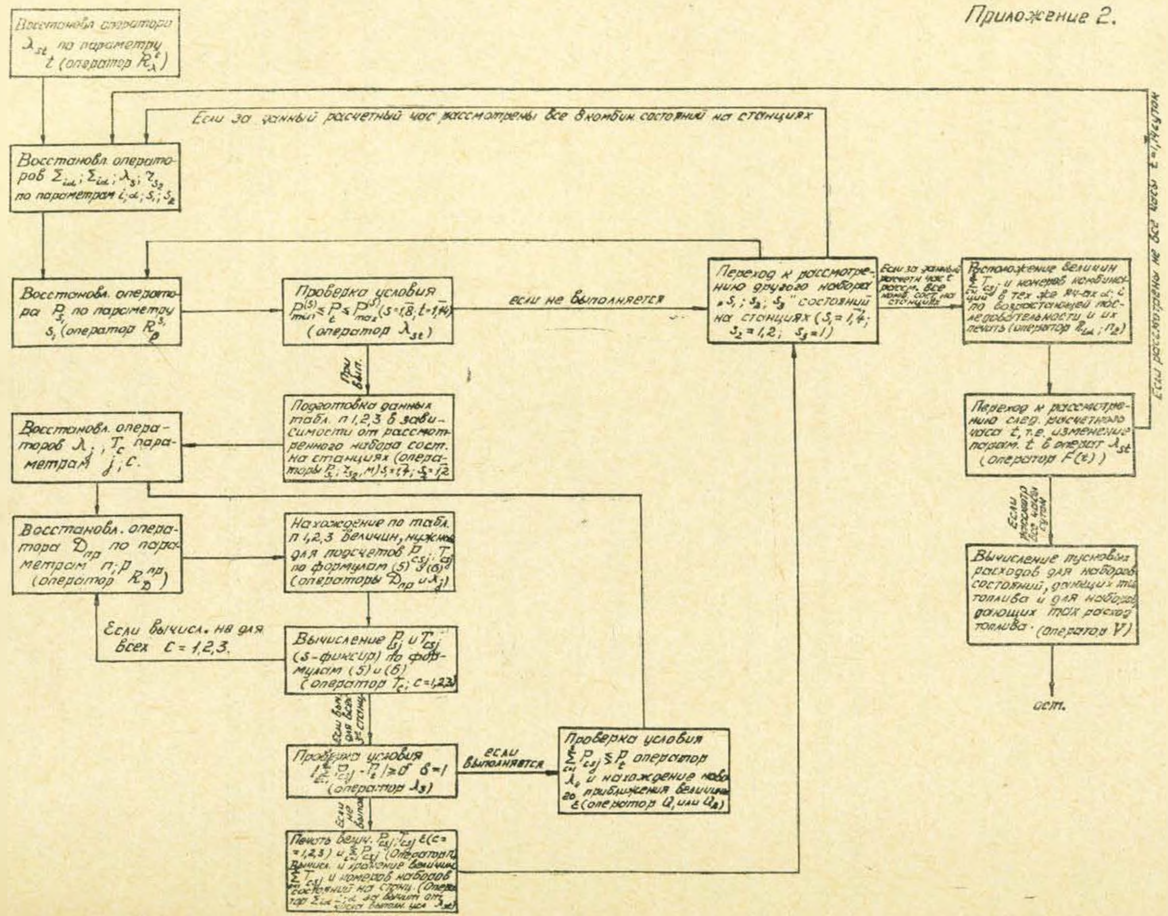
$$F(j)\lambda_j \overset{2}{\uparrow} \overset{3}{\downarrow} D_{np} F(p) F(n) \lambda_1 \overset{3}{\uparrow} T_c F(c) \lambda_2 \overset{4}{\uparrow} \lambda_3 \overset{5}{\uparrow} \lambda_4 \overset{6}{\uparrow} Q_1 \overset{7}{\uparrow} \overset{6}{\downarrow}$$

$$Q_2 \overset{7}{\downarrow} \overset{8}{\uparrow} \overset{5}{\downarrow} \Pi_1 F(t) \Sigma_{i\alpha} \overset{1}{\downarrow} F(A) F(\alpha) F(s_1) \lambda_5 \overset{9}{\uparrow} F(s_2) \lambda_6 \overset{10}{\uparrow}$$

$$A_{i\alpha} \Pi_2 F(t) \lambda_7 \overset{11}{\uparrow} V \text{ ост.}$$

Указанные в настоящей схеме операторы выполняют следующие функции:

Приложение 2.



1. λ_{st} — осуществляет проверку условия $(P_t \leqslant P_{\max}^{(s)})$ для каждой $(s=\overline{1,8})$ комбинаций состояний на станциях за каждый расчетный час t. $(t=\overline{1,14}$, так как из таблицы П 1—4 видно, что имеется всего 14 различных нагрузок в течении всей сутки).

Условие $P_{\min}^{(s)} \leqslant P_t)$ выполняется для всех $s=\overline{1,8}$ и $t=\overline{1,14}$.

2. Операторы P_β и r_γ подготавливают данные таблиц П 1—1, 2, 3 для первой и второй станций, соответственно, рассматриваемому набору состояний на этих станциях (на третьей — одно единственное состояние).

3. Оператор λ_j — согласно неравенству (4) находит из таблиц П 1—1, 2, 3 величину $\varepsilon_{cs_c(i+1)}$, а по ней из этих же таблиц оператор D_n находит и остальные величины, необходимые для расчетов по формулам (5) и (6) и посылает их в ячейки r_1+n $(n=\overline{1,5})$.

4. Оператор M — восстанавливает измененное в ходе решения задачи, при данном наборе состояний, начальное значение ε $(\varepsilon_1=0{,}520)$ при переходе к рассмотрению другого набора состояний и подготавливает соответственно этому набору значения $\varepsilon_{\max}^{(s)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(s)}$ в ячейках α и β.

5. Оператор T_c $(c=1, 2, 3)$ вычисляет мощности и топливо для станций системы, соответственно по формулам (5) и (6).

6. Операторы Q_1 и Q_2 вычисляют значения ε методом, описанным выше.

7. Оператор Π_1 печатает вычисленные значения $P_{cs_c}^{(n)}$, $T_{cs_c}^{(n)}$ $(c=1, 2, 3)$, $\sum\limits_{c=1}^{3} P_{cs_c}$ и соответствующее им значение ε.

8. Оператор $\sum_{10}$ вычисляет $\sum\limits_{c=1}^{3} T_{cs_c}$ последовательно для всех тех наборов состояний на данный расчетный час, которые удовлетворяют условию (4), и запоминает номер рассматриваемого набора в виде чисел $o,s_1s_2s_3$ $(s_1=\overline{1,4};\ s_2=\overline{1,2},\ s_3=1)$.

9. Оператор A_{ix} распределяет по возрастающей последовательности величины, вычисленные оператором $\sum_{10}$ и в таком порядке они печатаются оператором Π_2.

10. Оператор V вычисляет пусковые расходы для наборов состояний, указанных в пунктах а) и б).

11. Через R_x^a обозначены операторы восстановления, где нижний индекс x обозначает восстанавливаемый оператор, а верхний индекс a — параметр, по которому восстанавливается этот оператор.

12. Через λ — обозначены операторы сравнения, из которых требуют разъяснения только λ_3 и λ_4.

Оператор λ_3 проверяет условие (10).

Оператор λ_4 действует лишь при невыполнении условия (10) и проверяет условие (9) и в зависимости от этого действует оператор Q_1 или Q_2.

Результаты расчета решения поставленной задачи были получены с помощью вычислительной машины типа М-3. В качестве иллюстрации ниже приводятся некоторые из полученных результатов, которые представлены в форме таблиц 1 и 2 соответственно для часов $t=1$, 5, 17, 18 и $t=2$, 3, 4.

Наиболее выгодные состояния приводятся в первых строках указанных таблиц, невыгодные — в последних. В таблицах 3 и 4 приводятся результаты расчета для остальных часов суток, соответствующие режимам, дающие минимальный (табл. 3) и максимальный (табл. 4) расход топлива.

Таблица 1

Состояния	ε	P_1	P_2	P_3	$\sum_{i=1}^{3} T_i$
„221“	0,451	36,85	50	29,06	77,16
„311“	0,451	36,00	50	29,10	78,45
„411“	0‘455	35,53	50	30,70	78,40
„111“	0,443	39,96	50	25,78	79,58
„221“	0,478	57,20	25	33,50	79,90
„321“	0 630	48,00	25	43,27	81,03
„421“	0,630	48,00	25	43,27	81,30
„121“	0,460	58,00	25	32,70	93,98

Таблица 2

Состояния	ε	P_1	P_2	P_3	$\sum_{i=1}^{3} T_i$
„211“	0,443	29,06	50	25,78	72,14
„411“	0,446	28,40	50	27,10	72,41
„111“	0,437	31,31	50	23,70	73,35
„311“	0,440	30,00	50	24,70	73,72
„421“	0,588	45,50	25	34,80	75,53
„321“	0,575	46,90	25	33,50	78,38
„221“	0,463	46,50	25	33,50	78,52

Таблица 3

t	Состояния	ε	P_1	P_2	P_3	$\sum_{i=1}^{3} T_i$
1	„211“	0,451	36,85	50	29,06	77,16
2	„211“	0,443	29,06	50	25,78	72,14
3	„211“	0,443	29,06	50	25,78	72,14
4	„211“	0,443	29,06	50	25,78	72,14
. . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .
. . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .
22	„211“	0,729	73,00	50	50,00	108,30
23	„211“	0,630	70,90	50	43,25	102,07
24	„411“	0,582	44,29	50	33,40	82,50

Таблица 4

i	Состояния	з	P_1	P_2	P_3	$\sum_{i=1}^{3} T_i$
1	„121"	0,460	58,00	25	32,70	93,98
2	„221"	0,463	46,50	25	33,50	78,52
3	„221"	0,463	46,50	25	33,50	78,52
4	„221"	0,463	46,50	25	33,50	78,52
. . .	. . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .
. . .	. . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .	. . . . . .
22	„111"	0,726	73,00	50	50,00	109,85
23	„111"	0,461	73,00	50	41,17	102,93
24	„211"	0,461	45,00	50	33,10	86,69

Б. Расчет числа вычислительных операций

Пользуясь формулой (11) определяется число вычислительных операций для рассматриваемого примера. Для этого случая подставляются в формулу (11) следующие параметры

$$\sum_{i=1}^{14} N_i = 70; \quad N'_i = 42; \quad K_2 = 2101; \quad l_1 = 75; \quad l_2 = 11; \quad n_1 \approx 6; \quad n \approx 7$$

$$n = 11; \quad a_1 = 3; \quad a_2 = 2; \quad A_n = 8; \quad A_{n2} = 14; \quad M = 184$$

$$m = 3; \quad \nu = 14.$$

В результате получаются

$$K_1 \sum_{i=1}^{14} N_i = 182.700; \quad l_1 = 75; \quad 2K_2 = 4202: \quad N'_i l_2 = 462$$

или $K = 188414$.

При реализации этой задачи на машине М-3, выполняющей в среднем 30 *оп/сек* потребовалось времени — 6280 *сек* или 1 *час* 44 *мин*. Фактическое время расчета на машине М-3, имеющей оперативную память 1024 единицы на магнитном барабане, заняло 1 *час* 50 *мин*. Изложенная выше задача была реализована программой, состоящей из 146 команд. Вместе с постоянными параметрами было занято 510 ячеек оперативной памяти. Программа расчетов была разработана в группе программирования Института электротехники АН Армянской ССР и реализована на машине М-3 ВЦ АН Армянской ССР.

В. Анализ предела применимости предложенного алгоритма

В заключении рассмотрим возможность реализации предлагаемого алгоритма на современных ВМДД для случая, когда энергосистема состоит из 6, 9, 12, 15, 18 тепловых станций или путем представления этих систем тройками станций будем иметь по 2, 3, 4, 5, 6 троек станций.

Предположим, что на одной, из каждой тройки этих станций имеются по 4 состояния. На второй из той же тройки станций, имеются по два состояния, а на третьей, из тройки станций — по одному состоянию. Для каждого из этих случаев, число возможных комбинаций и число вычислительных операций, согласно формуле (11), приводится в таблице 5. Для этих же случаев, в таблице 6 приводится расчет необходимого машинного времени для ВМДД с быстродействиями $2{,}5 \cdot 10^3$ оп/*сек*, 10^4 оп/*сек*, $2 \cdot 10^4$ оп/*сек*.

Таблица 5

Колич. тепловых станций	6	9	12	15	18
Число возможных комбинаций . . .	64	512	4096	32768	262144
Число вычислительных операций . .	$33 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^6$	$38 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^8$	$36 \cdot 10^9$

Таблица 6

Кол. тепл. станц. / Быстродействие	6	9	12	15	18
$2{,}5 \cdot 10^3$ оп/*сек*	0,36 *ч*	3,9 *ч*	42,2 *ч*	277,7 *ч*	4000 *ч*
10^4 оп/*сек*.	0,09 *ч*	0,9 *ч*	16,6 *ч*	69,4 *ч*	1000 *ч*
$2 . 10^4$ оп/*сек*.	0,045 *ч*	0,45 *ч*	8,4 *ч*	34,7 *ч*	500 *ч*

Таблицы 5, 6 показывают, что для решения поставленной выше задачи по изложенному алгоритму, в случае, когда энергосистема состоит более чем из 9 тепловых станций, на современных ВМДД не имеет смысла. Поэтому возникает необходимость разработки более удобного алгоритма для систем, содержащих более 9 тепловых станций.

Г. Анализ результатов расчета

По результатам расчета могут быть получены различные расходы топлива $T = \sum_{i=1}^{24} \sum_{c=1}^{3} [T_{ct} + T_{ck} + T_{\text{ст}}]$ для одного и того же суточного графика нагрузок. Представляют наибольший интерес случаи распределения нагрузок между станциями системы, приводящие к минимуму и максимуму расхода топлива на станциях. А именно:

Случаи 1. когда на каждый час суток можно получить такую комбинацию состояний на станциях, при которой получается минимальный расход топлива равный $T_{\min} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{c=1}^{3} T_{\text{ct}} = 2044{,}16$ т. у. т. В этом случае получаются также и следующие пусковые расходы:

$$\sum_{c=1} [T_{ck} + T_{ст}] = 1{,}6 \text{ т. у. т.}$$

Случай 2. На каждый час суток можно получить комбинацию состояний, при которой получается максимальный расход топлива, равный

$$T_{\max} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{c=1}^{3} T_{ct\cdot} = 2201{,}86 \text{ т. у т.}$$

В этом случае получаются пусковые расходы 4,4 т. у. т.

Разница $T_{\max} - T_{\min} = 158$ т. у. т.

Важно отметить также и то, что в полученных результатах пусковые расходы топлива оказываются ничтожно малым по сравнению с расходами топлива для стационарных режимов работы агрегатов.

Ясно, что при любом другом, отличном от этих двух случаев, наборе состояний на станциях в каждый час суток расход топлива будет изменяться в пределах $T_{\min} = 2044{,}2 < T < T_{\max} = 2201{,}86$.

Следовательно, экономически наиболее выгодным является выбор состояний, при которых имеем

$$T = 2044{,}2 + 1{,}6 = 2045{,}8 \text{ т. у. т.}$$

Заметим, что хотя в данном примере пусковые расходы, вычисленные по методике, изложенной в [3], приведенного в данном номере журнала, получились малыми, это однако не означает, что они будут малыми и в других случаях. Поэтому во всех этих случаях пусковые расходы следует обязательно учитывать.

Институт электротехники
АН Армянской ССР

Поступило 9.X 1960

Հ. Տ. ԱԴՈՆՑ, Յու. Գ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Մ. Մ. ԱԴՈՆՑ

ԷՆԵՐԳՈՍԻՍՏԵՄԻ ՎԱՌԵԼԱՆՅՈՒԹԻ ՏՆՏԵՍՄԱՆ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ՈՒ ԾՐԱԳՐԻ ԿԱԶՄՈՒՄԸ ԵՎ ԴԳՀՄ ՄԻՋՈՑՈՎ ԱԳՐԵԳԱՏՆԵՐԻ ՎԻՃԱԿԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՕՐԻՆԱԿ

Ամփոփում

Հոդվածում տրված է էներգոսիստեմում գործող ջերմակայանների ագրեգատների վիճակների ընտրությունը, ելնելով վառելանյութի մինիմալ ծախսումից։

Դիտվում է էներգոսիստեմ, կազմված m *ջերմակայաններից, ագրեգատների* $S_1, S_2 \cdots S_m$ *վիճակներով։*

Հոդվածում բերված ալգորիթմը հնարավորություն է տալիս օրվա ամեն մի ժամի համար $\prod_{i=1}^{m} S_i$ *կոմբինացիաներից ընտրել վիճակների այնպիսի*

$S_1', S' \cdots S_m'$ կոմբինացիա, որը ապահովում է վառելանյութի մինիմալ ծախսում, հաշվի առնելով գործող ագրեգատների (կաթսաների և տուրբինոգեներատորների) կանգառները և ընթացքի գցելը։

Հոդվածի վերջում ալգորիթմը կիրառվում է մեկ էներգոսիստեմի համար. որը կազմված է երեք ջերմակայաններից, յուրաքանչյուրը՝ $S_1=4$; $S_2=2$; $S=1$ երեք վիճակներով։ Հաշվումները ցույց են տալիս, որ յուրաքանչյուր օրվա համար վառելանյութի մինիմալ ծախսումը կազմում է 2045,8 տ (պայմանական վառելանյութ), որը տարբերվում է մաքսիմալ ծախսումից (158 տ)։

Խնդիրը լուծված է Հայկական ՍՍՌ ԳԱ Հաշվողական Կենտրոնի M-3 դիսկրետ գործողության հաշվիչ մեքենայի (ԴԳՀՄ) միջոցով 1 ժամ 50 րոպեում։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маркович И. М.* Режим энергетических систем. Госэнергоиздат, 1957.
2. *Ляпунов А. А.* О логических схемах программы. Проблемы кибернетики, том I. Издательство физико-математической литературы, 1958.
3. *Григорьян Ю. Г.* Методика расчета пусковых расходов, связанных с выбором состояний агрегатов тепловых электростанций (данный номер журнала).

Приложение 1

Данные энергосистемы, необходимые для решения задачи, рассматриваемой в настоящей статье

Система состоит из трех тепловых станций ($s = 1, 2, 3$), характеристики которых заданы соответственно в таблицах П 1—1, 2, 3.

На первой из трех станций возможны четыре состояния ($s_1 = 1, 2, 3, 4$), на второй возможны два состояния ($s_2 = 1, 2$), на третьей станции — одно состояние ($s_3 = 1$). Следовательно для каждого часа суток на станциях возможны $S = s_1 s_2 s_3 = 4 \cdot 2 \cdot 1 = 8$ комбинаций состояний „$s_1 s_2 s_3$", а именно: „111"; „211"; „311"; „411"; „121", „221"; „321"; „421". Нагрузка энергосистемы для рабочего дня задана для каждого часа суток $P_t = 173\,K_t$, где $t = \overline{1{,}24}$; $0 < K_t \leq 1$; K_t — коэффициент, значения которого приведены в таблице П 1—4.

Таблица П 1—1

Режим	Состояние 1 $S_1=1$ 3 т. г. 6 кот.			Состояние 2 $S_1=2$ 3 т. г. 5 кот.			Состояние 3 $S_1=3$ 2 т. г. 5 кот.			Состояние 4 $S_1=4$ 2 т. г. 4 кот.		
j	ε_{11j}	P_{11j}	T_{11j}	ε_{12j}	P_{12j}	T_{12j}	ε_{13j}	P_{13j}	T_{13j}	ε_{14j}	P_{14j}	T_{14j}
1	0,300	28,2	16,81	0,300	25	14,01	0,300	25	14,01	0,300	18,5	11,21
2	0,436	28,2	16,81	0,438	25	14,01	0,434	25	14,01	0,435	18,5	11,21
3	0,440	36,5	25,85	0,453	38,5	23,71	0,440	30	17,91	0,4[illegible]1	33	18,67
4	0,447	46	27,21	0,469	51,5	26,05	0,446	33	19,25	0,466	42,5	20 23
5	0,458	55,5	31,7	0,487	63	29,45	0,451	36	20.62	0,573	42,5	21,89
6	0,464	63	31,98	0.596	63	32	0,455	40	22,46	0,600	48	28,82
7	0,577	63	31,98	0,618	68,5	35,47	0,46[illegible]	42.5	22,48	0,630	48	28,82
8	0,594	73	39,38	0,640	73	87.67	0,555	24,5	22,48	0,645	48	28,82
9	0,615	73	39,38	0,690	73	37,67	0,568	45.5	23,63	0,689	48	28,82
10	0,700	73	39,38	0,740	73	37,67	0.580	48	24,88	0,731	48	28,82
11	0,740	73	39,38	0.740	73	37,67	0,740	48	24,88	0,740	48	28,82

Таблица П 1—2

Режим	Состояние 1 $S_2=1$ 2 т. г. 2 кот.			Состояние 2 $S_2=2$ 1 т. г. 2 кот.		
j	ε_{21j}	P_{21j}	T_{21j}	ε_{22j}	P_{22j}	T_{22j}
1	0,300	25	19,72	0,300	21	18,22
2	0,320	25	19,7[illegible]	0,310	23,5	18,99
3	0,340	38,5	23,91	0,320	25	19,33
4	0,360	50	28,1	0,355	25	19,33
5	0,380	50	28.1	0,431	25	19,33
6	0,410	50	28,1	0,540	25	19,33
7	0,450	50	28.1	0,570	25	19,33
8	6,500	50	28,1	0,603	25	19,33
9	0,540	50	28,1	0,688	25	19,33
10	0,610	50	28,1	0.703	25	19,33
11	0,740	50	28,1	0,740	25	19,33

Таблица П 1—3

Режим	Состояние 1 $S_3=1$ 2 т. г. 3 кот.		
j	ε_{31j}	P_{31j}	T_{31j}
1	0.300	21,5	26,3
2	0,432	21.5	26,3
3	0,462	33,5	31,79
4	0,583	33,5	32,79
5	0,605	40	35,03
6	0,538	44	38
7	0,678	44	34,38
8	0,710	46,5	40,6
9	0,720	50	42,6
10	0,730	50	42,6
11	0,740	50	42.6

Таблица П 1—4

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K_t	0,667	0,606	0,606	0,606	0,667	0,739	0,776	0,861	0,909	0,879	0,739	0,756

t	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
K_t	0,788	0,812	0,788	0,756	0,667	0,667	0,697	0,806	0,879	1	0,952	0,739

Замечание: Так как из 24-х заданных значений коэффициента K_t всего 14 различных, то будем считать, что наши сутки состоят из 14 часов.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Р. А. ЧУГУРЯН

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ВАННЕ КАРБИДНОЙ ПЕЧИ

Закономерности прохождения тока в плавильном пространстве, а следовательно и превращения электрической энергии в тепловую в ванне карбидной печи, до настоящего времени являются предметом обсуждений. Существует мнение [1, 2], что необходимое тепло для образования карбида кальция выделяется в дуге, и при классификации руднотермических печей карбидную печь причисляют к печам, работающим в дуговом режиме; при этом предполагается, что энергия, выделяющаяся в дуге, намного больше энергии, выделяющейся в расплаве. Другие [3, 4, 5] полагают, что энергия дуги примерно равна энергии, выделяющейся в шихте. Наконец, существует предположение, что карбидные печи работают в чистом режиме печи сопротивления и что в ней электрическая энергия превращается в тепловую в шихте и расплаве, и энергия дуги по сравнению с энергией шихты ничтожна [6, 7].

Выяснение способа превращения электрической энергии в тепловую в ванне карбидной печи практически важно, так как с этим связана правильная эксплуатация карбидной печи — ее обслуживание, управление, автоматика. Ниже дается оценка характера сопротивления исследованных нами карбидных печей. Анализ и выводы по затронутому вопросу основаны на ряде опытов, проведенных в карбидном цехе завода им. С. М. Кирова.

Описанные здесь эксперименты являются частью комплекса экспериментальных исследований, проведенных Институтом электротехники Академии Наук Армянской ССР по программе, предложенной доктором технических наук, профессором Г. Т. Адонцом.

1. Напряжение между нулевой точкой пода и электродом

Для определения характера сопротивления ванны печи нами проводилось осциллографирование напряжения между нулевой точкой пода и фазовым электродом. При этом точка замера на электроде бралась на 20 *см* ниже электродного кольца.

При нормальной эксплуатации печи электродное кольцо расположено на расстоянии 120—130 *см* от нижнего конца электрода. Следовательно, часть электрода, расположенная ниже точки замера, составляет примерно 100 *см*. На этом участке, согласно литературным данным [5], активное сопротивление рабочей части электрода составляет около 23% от общего сопротивления короткой сети. Как показали измерения, падение напряжения в короткой сети фаз «А» и «В» без электродов составляет 3,6 *в*. Индуктивное сопротивление короткой сети больше активного в шесть раз. Учитывая также, что сопротивление электрода в три раза меньше, чем активное сопротивление остальной части короткой сети, падение напряжения на рабочем участке электродов фаз „А“ и „В“ составит 0,2—0,3 *в*, что не может существенным образом влиять на характер кривой напряжения, и, следовательно, она остается синусоидальной. Падение напряжения в короткой сети на фазе „С“ сравнительно больше, вследствие чего кривая напряжения между подом и электродом искажается, ибо ток не синусоидален (рис. 1). Что касается индуктивного сопротивления рабочего участка электрода, то им можно пренебречь. Расчетным путем можно показать [8], что индуктивность на этом участке не выше $1{,}2 \cdot 10^{-7}$ гн.

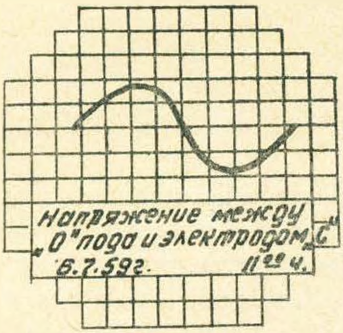


Рис. 1.

Как показали замеры, напряжение между электродом и подом печи для фаз «А» и «В» составляет 84—85 *в*, а для фазы «С» — 63—64 *в*. Напряжение под-электрод на фазе «С» ниже из-за глубокой посадки электрода.

2. Вольт-амперная характеристика печной нагрузки

Ниже приводятся вольт-амперные характеристики для каждой фазы исследуемой нами печи. Эти характеристики построены с учетом отсутствия сдвига фаз между током и напряжением под-электрод.

На рис. 2 представлены кривые напряжения под-электрод и ток фазы «А», а также кривая изменения сопротивления в течение одного полупериода, при нормальном режиме работы печи. Как видно из диаграммы, точки максимума тока и напряжения и минимум сопротивления совпадают по времени. На этом же рисунке дана вольт-амперная характеристика фазы «А», имеющая две точки пересечения. Стрелками показаны восходящие и нисходящие ветви этой характеристики.

Приведенная вольт-амперная характеристика является общей характеристикой дуги и шунта (шихты). Поэтому физическая интерпретация каждой точки этой кривой представляет значительную трудность. Однако по площади гистерезисной петли можно дать качественный анализ режима дуги, так как даже при нелинейности вольт-амперной характеристики шихты гистерезис не должен иметь место, поскольку сопротивление шихты в течение четверти периода не может существенно изменяться с изменением температуры, тогда как небольшое изменение температуры резко влияет на процессы в дуговом разряде [9], т. е. на сопротивление дуги.

Из изложенного следует, что величина площади петли характеризует те энергетические процессы, которые имеют место в дуге; нелинейность вольт-амперной характеристики шихты, изменяя форму кривой гистерезиса, не может влиять на величину площади. Площадь петли может служить критерием, характеризующим работу данной фазы печи. На рис. 3 приведены аналогичные кривые для фазы «В». Как видно из кривых, мак-

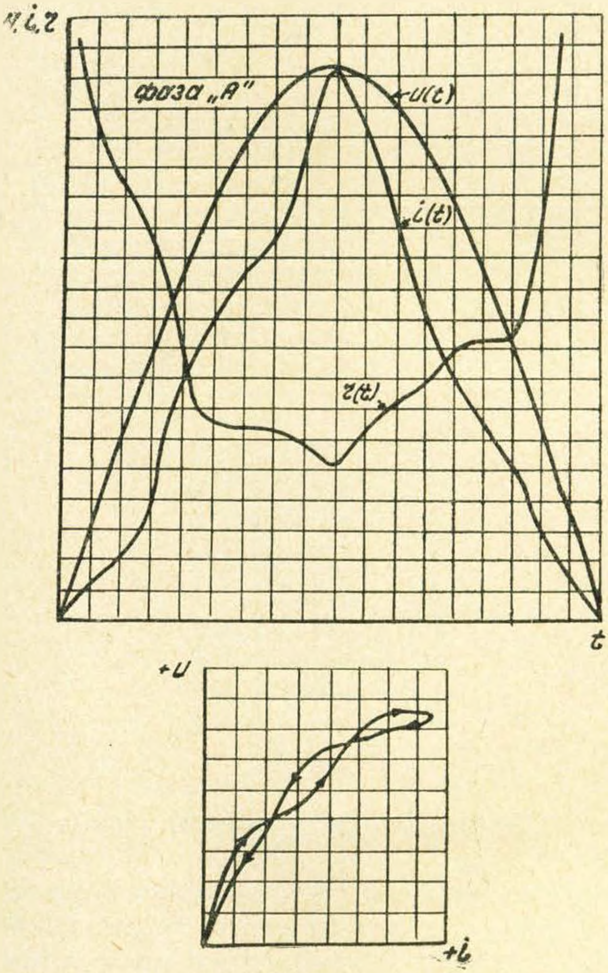


Рис. 2.

симумы тока и напряжения и минимум сопротивления ее совпадают во времени.

Сопротивление подэлектродного пространства фазы «В» в течение одного полупериода претерпевает сравнительно меньшие изменения. Вольт-амперная характеристика этой фазы также имеет гистерезисную петлю, восходящие и нисходящие ветви которой не пересекаются.

На рис. 4 представлены аналогичные кривые для фазы «С». Восходящие и нисходящие ветви вольт-амперной характеристики этой фазы пересекаются только один раз.

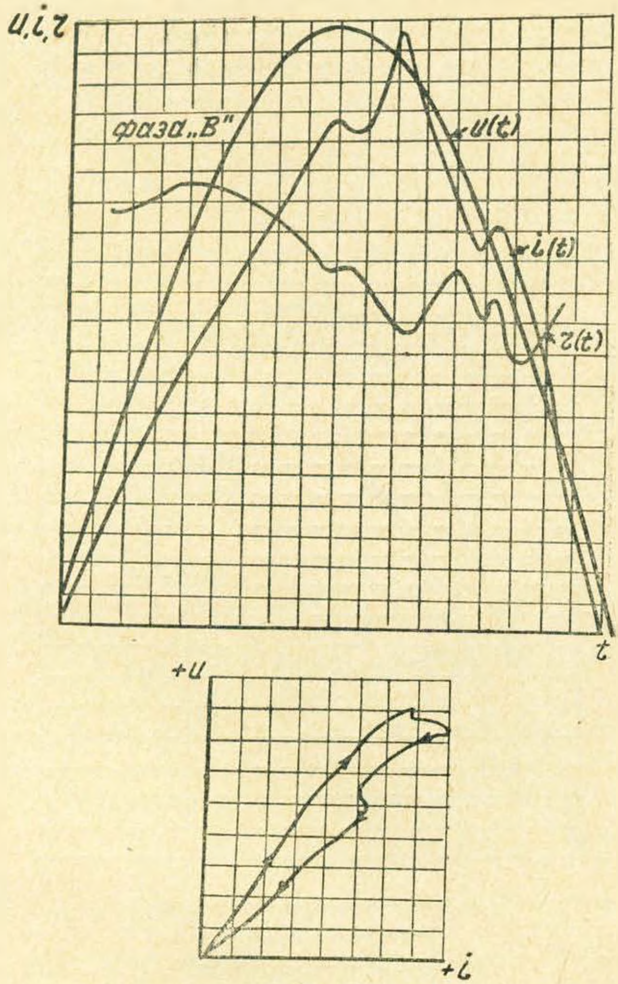


Рис 3.

3. Анализ экспериментальных данных

Анализируя осциллограммы токов, напряжений и вольтамперные характеристики, можно установить следующее положение. Включение под синусоидальное напряжение печной нагрузки вызывает резкое отступление формы кривой тока от синусоиды. Это говорит о наличии в цепи нелинейного элемента. Полагая, что вся короткая сеть обладает линейным подэлектродного пространства. Как указано выше, напряжение между под электродного пространства. Как указано выше, напряжение между нулевой точкой пода и электродом в исследуемой нами печи можно считать синусоидальным. Правда, эта кривая на фазе «С» — «Мертвая» — имеет некоторое отступление от синусоиды.

Синусоидальная форма кривой напряжения между подом и электродом некоторым образом затрудняет определенный вывод о наличии в печи явно выраженной дуги. Однако по кривым тока можно видеть, что для данной фазы исследуемой печи в определенные периоды работы, общий

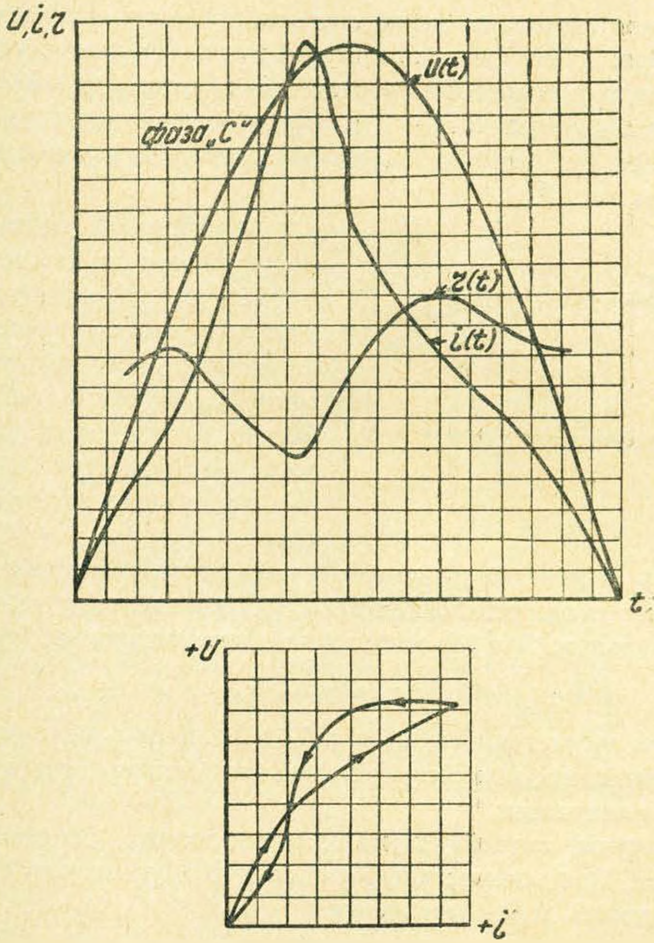


Рис. 4.

характер деформации кривой тока периодически повторяется. Это дает основание предположить, что в ванне печи имеют место периодические электрические процессы. К тому же вольт-амперная характеристика общего сопротивления фазы имеет форму гистерезисной петли, что присуще дуге. О наличии дуги говорит также характерное для нее искажение кривой тока. Но искажение здесь несколько смягчено шунтирующим влиянием шихты. О наличии шунтированной дуги в ферросплавных печах было доказано проф. С. И. Тельным, Г. А. Сисояном и И. Т. Жердевым [4]. Мысль о наличии шунтированной дуги в карбидных печах высказана профессором Г. А. Сисояном [5]. Из работ указанных авторов следует важное положение, что форма кривой тока в момент зажигания и погасания дуги не должна иметь резкий характерный разрыв, так как через шихту непрерывно проходит ток.

Чем вызван синусоидальный характер напряжения между подом и электродом печи в наших экспериментах?

Для математического обоснования составим электрическую схему замещения карбидной печи. Решение этой задачи для трехфазной несимметричной печи связано со значительными трудностями. Оно намного облегчается, если пренебречь асимметрией токов. Это упрощение не внесет значительных погрешностей в расчеты, ибо степень асимметрии на исследуемых печах не превышает 8—10%. При указанном допущении становится возможным рассмотрение одной фазы печи. Электрическая схема ее приведена на рис. 5.

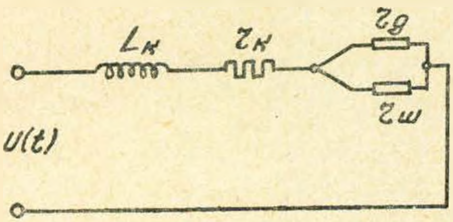


Рис. 5.

Анализ этой схемы приводит к следующим выводам:

1. При условии наличия источника бесконечной мощности и при отсутствии кажущегося сопротивления Z_k короткой сети напряжение на дуге должно быть синусоидальным несмотря на потребление приемником несинусоидального тока.

2. При отсутствии индуктивности L_k короткой сети и наличии r_k, соизмеримого с сопротивлением печи, напряжение на дуге должно быть несинусоидальным. Это объясняется тем, что напряжение на дуге

$$u_g = u_c - ir_k.$$

3. При отсутствии параметра L_k и наличии r_k короткой сети значительно меньшего, чем сопротивление печи, напряжение дуги мало отличается от синусоиды.

Рассмотрим случай, когда имеется также индуктивность короткой сети. При анализе дифференциального уравнения, составленного для приведенной схемы замещения

$$U_m \sin \omega t = ir_k + L_k \frac{di}{dt} + i \frac{r_m \cdot r_g(i)}{r_m + r_g(i)}$$

можно заметить, что параметр L_k влияет на форму кривой тока, деформируя ее симметричность в полупериоде относительно оси ординат. Как ток шихты, так и индуктивность стремятся сгладить изломы кривой тока в начале и конце полупериода, т. е. при прохождении тока через нулевые значения, уменьшая при этом быстроту изменения силы тока. Ясно, что при прямолинейной вольт-амперной характеристике дугового промежутка, ток печи и напряжение дуги синусоидальны; если же вольтамперная характеристика дугового промежутка не прямолинейна и короткая сеть обладает достаточным сопротивлением, то ток и напряжение на дуге несинусоидальны. При относительно малом сопротивлении короткой сети напряжение на дуге, даже при нелинейной вольт-амперной характеристике, может быть синусоидальным.

При сравнении формы кривой тока фазы «В» при нормальной работе и при сливе печи можно заметить, что ток этой фазы при сливе претерпевает большие искажения. Это сказывается и на вольт-амперной характеристике. Наблюденное явление еще раз подтверждает высказанную мысль [5], что при благоприятных тепловых условиях дуга не может резко влиять на форму кривой тока. Таким образом, резкое нарушение формы кривой тока фазы «В» во время слива печи целиком объясняется нарушением теплового режима дугового разряда. Этому может содействовать, в частности, изменение плотности и давления газов подэлектродного про

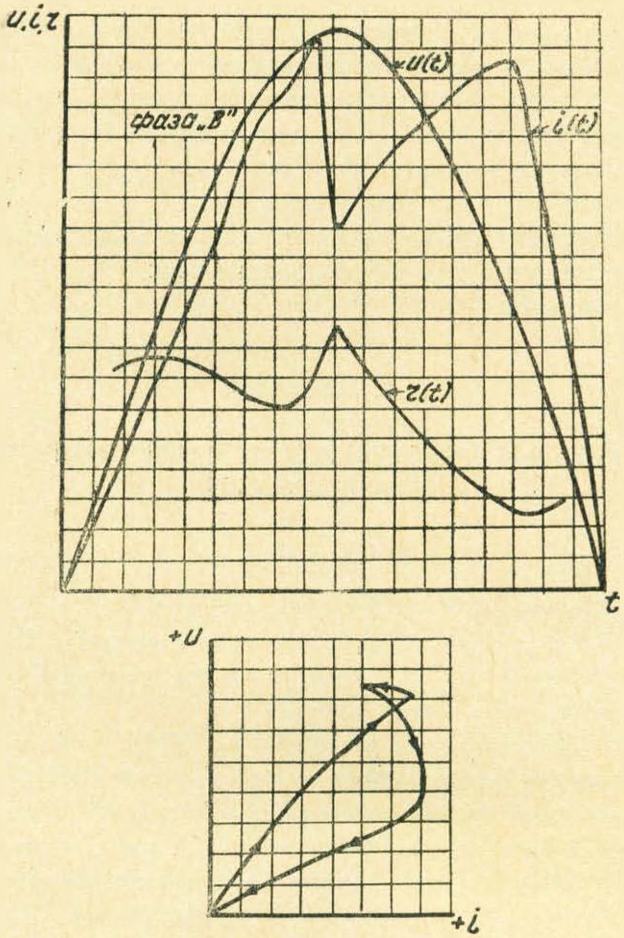


Рис. 6.

странства, а также другие явления, связанные с понижением температуры печи. На рис. 6 дана вольт-амперная характеристика фазы «В» при сливе. При каждом сливе вольт-амперная характеристика имела одну и ту же форму гистерезисной петли. Это нарушение формы кривой тока относительно мало заметно на остальных фазах, так как слив на исследуемой печи производился из-под средней фазы.

Выводы. 1. Вольт-амперные характеристики для общего рабочего сопротивления исследуемых нами карбидных печей имеют гистерезисную петлю, что полностью следует приписать дуге.

2. Вольт-амперные характеристики, являющиеся суммарной характеристикой дуги и шунта (шихты), для отдельных фаз печи различны, так

как сопротивление каждой фазы в течение периода изменяется по разным законам.

3. Резкое изменение вольт-амперной характеристики фазы «В» при сливе следует приписать быстрым изменениям теплового режима дугового промежутка (изменение температуры, плотности и давления газов и т. п.).

4. Для контроля за нормальным горением дуги может быть рекомендовано держать на пульте управления на каждой фазе печи катодный осциллограф, включенный по схеме петли (для фигур Лиссажу), или же с переключающим устройством — один для всей печи. Напряжение для вертикальных пластинок осциллографа надо брать с участка короткой сети, а для горизонтальных — от пода и электрода.

Схема эта может быть использована в качестве дополнительного контролирующего элемента при регулировании печи.

Институт электротехники
АН Армянской ССР

Поступило 2.II. 1961

Ռ. Ա. ՃՈՒՂՈՒՐՅԱՆ

ԿԱՐԲԻԴԻ ՎԱՌԱՐԱՆՆԵՐՈՒՄ ՏԵՂԻ ՈՒՆԵՑՈՂ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ամփոփում

Հոդվածում քննարկվում են կարբիդի վառարանների աշխատանքի էլեկտրական ռեժիմների մի շարք հարցեր։ Ստացված արդյունքները և եզրակացությունները հիմնված են Ս. Մ. Կիրովի անվան գործարանում կատարված հետազոտական աշխատանքների վրա։

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ նշված վառարանները աշխատում են էլեկտրական աղեղի ռեժիմի առկայության պայմաններում։ Այդ հաստատվում է ստացված վոլտ-ամպերային բնութագրերով։ Չնայած նրան, որ վոլտ-ամպերային բնութագիրը հանդիսանում է բովախառնուրդի և աղեղի համար գումարային բնութագիր, այնուամենայնիվ բնութագրի հիստերեզիսի օղակը լրիվ հաստատում է աղեղի ռեժիմի առկայությունը։ Դեռ ավելին. այդ օղակի փոփոխման և վառարանի աշխատանքային ռեժիմի միջև գոյություն ունի օրինաչափություն։ Առաջարկվում է այդ օրինաչափությունը հաշվի առնել վառարանների կարգավորման հարցերը լուծելիս, որպես լրացուցիչ տեղեկություն վառարանի աշխատանքի մասին։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Максименко М. С.* Основы электрохимии. ОНТИ, 1934.
2. *Бингам. Н.* Производство карбида кальция, ОНТИ, 1934.
3. *Бочке Н.* Электроплавильные печи, 1934.
4. *Тельный С. И.* и *Жердев И. Т.* „Теория и практика металлургии", № 9, 1937.
5. *Сисоян Г. А.* Электрическая дуга в руднотермической печи, 1954.
6. *Kluss E.* Die Probleme des elektrischen Lichtbogen und Widerstandsofens. 1951.
7. *Paussig R.* Die Industrie des Kalzium Karbides, 1940.
8. *Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.* Расчет индуктивностей, 1959.
9. *Капцов Н. А.* Электрические явления в газах и в вакууме, 1950.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

А. А. АСЛАМАЗЯН

РАБОТА ГИДРОТУРБИНЫ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Сплошной поток жидкости, поступая в канал равномерно вращающегося рабочего колеса турбины, подвергается на ее лопасти разрыву сплошности. При этом создаются такие условия работы турбины, которые выражаются общеизвестным уравнением:

$$H\eta_{1}=\frac{v_{1}u_{1}\cos\alpha_{1}-v_{2}u_{2}\cos\alpha_{2}}{g} \qquad (1)$$

или выражением для вращающего момента:

$$M_{c}=\frac{\gamma QH}{\omega}\eta_{1}, \qquad (2)$$

где v_1, v_2 абсолютные и u_1, u_2 окружные скорости потока у входа и выхода из рабочего колеса, α_1, α_2 углы между векторами v и u, H— напор, ω — угловая скорость, Q—расход, γ — объемный вес воды и η_1 — кпд турбины.

В случае неравномерного вращения рабочего колеса, т. е. при неустановившихся режимах, изменение M_c и ускорения агрегата связаны уравнением

$$J\frac{d\omega}{dt}=M_{c}-M_{г}, \qquad (3)$$

где J — момент инерции вращающихся масс агрегата, $M_г$ — момент генератора, t — время.

Из уравнения (3) следует, что при $M_c \neq M_г$ агрегат получает некоторое ускорение $\frac{d\omega}{dt}$ под действием избыточного момента ($M_c - M_г$), который согласно (2) при постоянном напоре и расходе в свою очередь изменяется с изменением угловой скорости. Значения M_c для различных ω при установившихся режимах можно получить из обычных характеристик турбины, снятых в условиях статических режимов. До сего времени неизвестна возможность использования характеристик турбин, построенных в условиях установившегося режима (статический) для случая исследования неустановившегося режима (динамический) работы турбины и не установлена соответствующая зависимость между вращающим моментом и угловой скоростью:

$$M_{д}=f(\omega_{д}).$$

Настоящая работа посвящена данному вопросу.

Для решения поставленной задачи рассмотрим движение потока по каналу неравномерно вращающегося рабочего колеса при $H = \text{const}$. В любой момент времени поток испытывает сложное ускорение, благодаря чему векторы абсолютной скорости v, и ее составляющих окружной скорости и относительной скорости w будут менять свое направление. Однако при всех режимах и для любого момента времени имеем:

$$\bar{v} = \bar{u} + \bar{w}. \tag{4}$$

Следовательно, суммарное перемещающее ускорение будет

$$|j| = |j_u| + |j_w|, \tag{5}$$

где j_u и j_w — ускорения по направлениям u и w.

Если в канале неравномерно вращающегося рабочего колеса (рис. 1) выделить элемент потока площадью ds, длиной dl, массой dm и применить к нему закон динамического равновесия, то уравнение (5) в проекции на направление w примет вид:

$$|j_w\, dm| = |\Sigma F_e|_w - |j_u\, dm|_w, \tag{6}$$

где ΣF_e — сумма внешних сил, действующих на выделенный элемент потока.

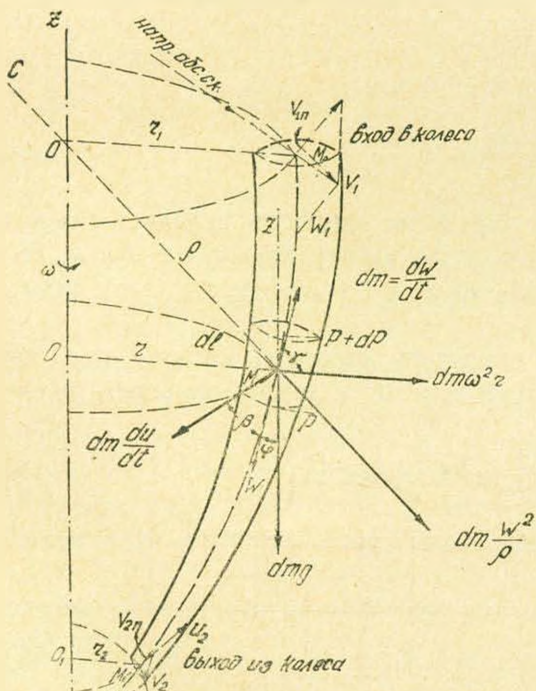


Рис. 1. Схема сил действующих на турбину.

После замены отдельных членов уравнения (6) соответствующими значениями и вводя ряд обозначений, как это делает Тено [1], получим уравнение, выражающее работу гидротурбины при неустановившемся режиме в виде [2]:

$$H\eta = \frac{u_1 v_1 \cos\alpha_1 - u_2 v_2 \cos\alpha_2}{g} + \frac{2A}{g}\frac{d\omega}{dt}. \tag{7}$$

Как известно, расход через турбину является функцией напора, скорости вращения и открытия направляющего аппарата

$$Q = f(H, \omega, \alpha).$$

Если создать такие условия, чтобы при переходном процессе напор и открытие турбины оставались постоянными, то будем иметь:

$$Q = f\ (\omega).$$

Изменение Q в зависимости от изменения ω для реактивных турбин различных быстроходностей происходит по разному.

Для всех этих турбин закон изменения Q в зависимости от ω при $H = \mathrm{const}$ практически можно принять за прямую, имеющую соответствующий наклон: для тихоходных турбин $\frac{Q - Q_0}{\omega} > 0$,

для нормальных $\frac{Q - Q_0}{\omega} = 0$

и быстроходных $\frac{Q - Q_0}{\omega} > 0$,

где Q_0 — расход через турбину при определенном открытии и при $\omega = 0$.

Как показали эксперименты, приведенные на динамической модели (при условии a_0, $= \mathrm{const}$, $H = \mathrm{const}$), изменение расхода через турбину в зависимости от ω при динамических режимах происходит так, как при статическом режиме, т. е. независимо от того режим установившийся или неустановившийся, каждой $\omega_д$ динамического режима соответствует определенный $Q_д$ и каждой $\omega_с$ статического режима соответствует определенный Q_c. Следовательно, когда $\omega_д = \omega_c$ имеем $Q_д = Q_c$.

На рис. 2 даны кривые $Q = f\,(n)$ статических режимов работы

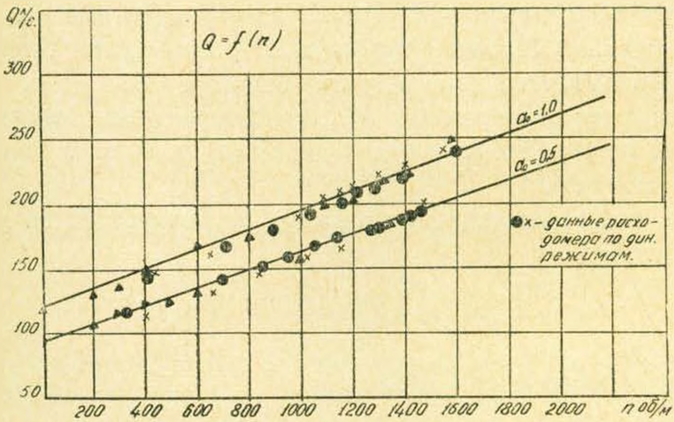


Рис. 2. Кривые зависимости $Q = f\,(n)$

турбины. Крестиками нанесены экспериментальные данные динамических режимов.

Вышесказанное дает право для данной турбины написать

$$\frac{Q_c - Q_0}{\omega} = \frac{Q_д - Q_0}{\omega} = \mathrm{const}.$$

Умножая уравнение (7) на $\gamma \left(\frac{Q - Q_0}{\omega} \right)$, вводя обозначение

$K = \pm \frac{\gamma}{g}\left(\frac{Q - Q_0}{\omega}\right)$ и учитывая, что при $Q_0 = 0$, $\omega_0 = 0$ работа турбины равна нулю, получим:

$$M_\partial = \frac{\gamma QH}{\omega} \eta_i = \frac{\gamma Q}{\omega} \frac{u_1 v_1 \cos\alpha_1 - u_2 v_2 \cos\alpha_2}{g} \pm 2AK \frac{d\omega}{dt} . \tag{8}$$

Таким образом получено выражение для вращающего момента при динамическом режиме работы турбины.

Зная, что $\frac{\gamma Q}{\omega} \frac{u_1 v_1 \cos\alpha_1 - u_2 v_2 \cos\alpha_2}{g} = M_c$

уравнение (8) перепишем в таком виде:

$$M_\partial = M_c \pm 2AK \frac{d\omega_\partial}{dt_\partial} = M_c \pm M_i , \tag{9}$$

где

$$M_i = 2AK \frac{d\omega}{dt} . \tag{10}$$

Из уравнений (9) и (10) следует, что при неустановившемся режиме работы турбины в результате влияния приращения угловой скорости на изменение количества движения потока во входном и выходном сечениях рабочего колеса возникает некоторый дополнительный момент, величина которого зависит от конструктивных особенностей турбины, характеризуемых коэффициентами A и K и от приращения угловой скорости турбины. С увеличением быстроходности и размеров рабочего колеса, увеличивается Mi.

В зависимости от величины M_i, характеристики гидротурбин при динамических режимах будут отличаться от таковых, снятых при статических режимах.

Полученный вращающий момент (9) затрачивается на ускорение вращения агрегата

$$M_\partial = J \frac{d\omega_\partial}{dt_\partial} \tag{11}$$

Приравнивая (9) к (11), получим:

$$J \frac{d\omega_\partial}{dt_\partial} = M_c \pm 2AK \frac{d\omega_\partial}{dt_\partial} \tag{12}$$

или

$$\frac{d\omega_\partial}{dt_\partial} = \frac{M_c}{J \pm 2AK} . \tag{13}$$

Для статического режима когда $M_i = 0$ формула (12) имеет вид:

$$J \frac{d\omega_c}{dt_c} = M_c . \tag{14}$$

Подставляя (14) в уравнение (13), получим:

$$\frac{d\omega_\partial}{dt_\partial} = \frac{J}{J \pm 2AK} \frac{d\omega_c}{dt_c}. \tag{15}$$

Уравнения (12) и (15) связывают изменения во времени вращающего момента и скорости вращения агрегата при неустановившемся режиме, с учетом момента инерции агрегата и конструктивных особенностей турбины. Отметим, что во всех случаях принимается колесо как жестко-лопастное.

Значение коэффициента A для каждой турбины определяется из проекта рабочего колеса, а коэффициент K для турбин разных типов в зависимости от n_s дан на рис. 3. Для пересчета статических харак-

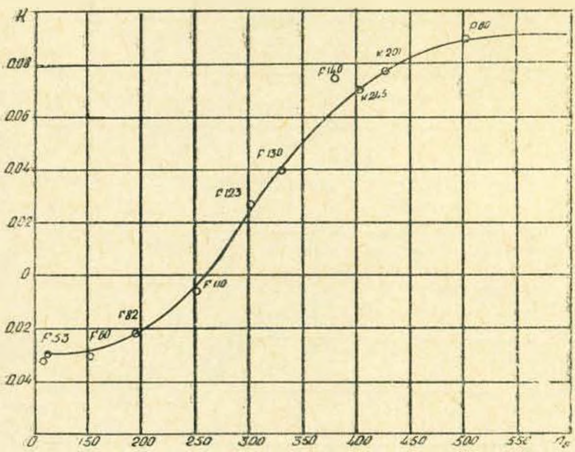


Рис. 3. Значение коэффициента „К" в зависимости от n_s турбины.

теристик на динамические, в уравнении (15) ω заменяется на $\frac{\pi n}{30}$, а дифференциалы заменяются конечными разностями, т. е.:

$$\frac{\Delta n_\partial}{\Delta t_\partial} = \frac{J}{J \pm 2AK} \frac{\Delta n_c}{\Delta t_c}. \tag{16}$$

Последовательность расчета динамического момента дана в работе [2].

Эксперименты, приведенные на динамической модели в лаборатории моделирования ИнЭГ АН АрмССР в условиях сохранения постоянства напора во всех режимах ее работы показали хорошее совпадение динамических кривых $M = f(n)$, полученных экспериментом и расчетами.

Для получения динамических характеристик с учетом влияния переменного по времени напора были произведены серии экспериментов [3]. Результаты исследований работы гидротурбины на динамической модели в условиях сохранения постоянства напора в установившихся и неустановившихся режимах ее работы, а также в случае нарушения постоянства напора в результате, изменений давления в прямоосной отсасывающей трубе, опубликованы в [2]. Дальнейшие исследования были проведены на динамической модели с подводящим трубопроводом длиной 69 *м* и диаметром $D = 0{,}64$ *м*, спиральной камерой и коленообразной отсасывающей трубой. На рис. 4 приведены характеристики $M = f(n)$ колеса K 245, полученные при данных исследованиях.

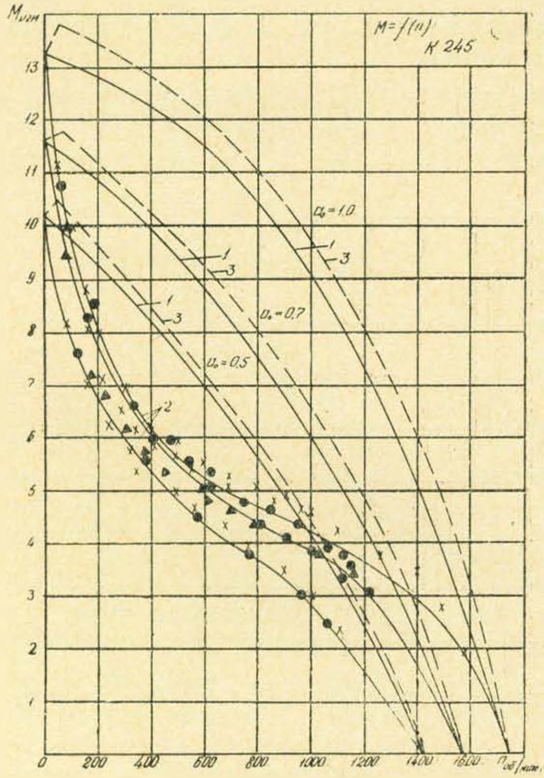


Рис. 4. Кривые зависимостей $M - f(n)$.

Кривые, проведенные пунктирной линией, соответствуют результатам расчетов динамических моментов по вышерекомендованным выражениям. Поскольку эти формулы выведены из условия постоянства напора, то, как видно, экспериментальные динамические характеристики резко отличаются от расчетных. Для установления возможности сравнения динамических характеристик одной и той же турбины, работающей при переменном напоре, необходимо приведение характеристик к одним и тем же условиям.

Для этого из уравнения (7) согласно теории моделирования получаем следующий комплекс масштабных множителей

$$\frac{\alpha_u \alpha_v}{\alpha_g \alpha_H \alpha_\eta} = 1, \tag{17}$$

$$\frac{\alpha_A \alpha_w}{\alpha_D \alpha_H \alpha_\gamma \alpha_t} = 1. \tag{18}$$

Величины, входящие в уравнение (7) относящиеся к условиям H=const, обозначены индексом „а“, а при H=const индексом „в“. Отношение же этих величин обозначено через α, индекс при котором относится к искомой величине.

Принимая для одной и той же турбины $\alpha_D = 1$; $\alpha_A = 1$; $\alpha_g = 1$; $\alpha_\eta = 1$ и пренебрегая инерцией жидкости на коротком участке, получены формулы пересчета параметров M, n и t турбины, работающей в динамических режимах для перехода от условия H = const к условию $H \neq$ const.

$$n_a = n_b \sqrt{\frac{H_a}{H_b}}, \tag{19}$$

$$M_a = M_b \frac{H_a}{H_b}, \tag{20}$$

$$t_a = t_b \sqrt{\frac{H_b}{H_a}}, \tag{21}$$

т. е. получены обычные формулы пересчета.

Следовательно, общеизвестные формулы для пересчета статических характеристик турбины применимы и для пересчета ее динамических характеристик, но с пересчетом и времени. По указанным формулам 19, 20, 21 можно пересчитать динамические кривые (3, рис. 4) из условий H=const, на переменный напор $H = f(t)$. Результаты подобного пересчета нанесены на кривые $M = f(n)$ (рис. 4)

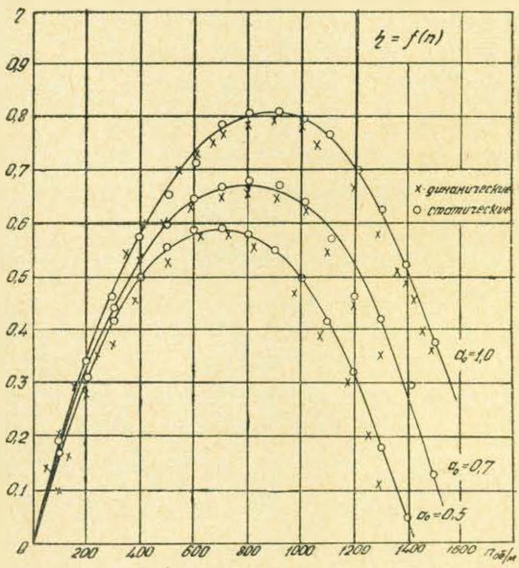


Рис. 5. Изменение $\eta = f(n)$ по схеме III.

крестиками. Как видно, эти точки хорошо ложатся на экспериментальные кривые, что подтверждает правильность формул пересчета. Из вышесказанного вытекает, что при одинаковых напорах в любой момент времени $M_i = M_0 - M_c$. При этом динамические характеристики турбин отличаются от статических тем, что в них учитывается M_i, зависящий от конструктивных особенностей (A и K) момента инерции и величины ускорения данной турбины. Этим доказывается также, что коэффициент полезного действия турбины, в статическом и динамическом режимах ее работы остается одинаковым, т. е. $\eta_0 = \eta_c$, что очень важно для исследования переходных процессов гидроэнергосистем. На рис. 5 даны кривые $\eta = f(n)$ статических режимов работы модельной турбины по вышеуказанной схеме. Крестиками нанесены данные динамических режимов.

Таким образом выведенные расчетные формулы и формулы пересчета дают возможность по статическим характеристикам турбины получить ее динамические характеристики. не прибегая к эксперименту.

Институт энергетики и гидравлики
АН АрмССР

Поступило 20.V 1960

Հ. Ա. ԱՍԼԱՄԱԶՅԱՆ

ՀԻԴՐՈՏՈՒՐԲԻՆԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ ԱՆՑՄԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐՈՒՄ

Ամփոփում

Ներկա հոդվածում շարադրվում է չհաստատված ռեժիմներում տուրբինի աշխատանքը արտահայտող հավասարման արտածումը։

Պարզվում է, որ այդ ռեժիմներում տուրբինի պտտող մոմենտը ավելանում է մի իներցիոն մոմենտով, որի մեծությունը կախված է ագրեգատի պտտող մասերի իներցիայի մոմենտից և աշխատող անիվի կոնստրուկտիվ առանձնահատկությունները բնորոշ A *և* K *մեծություններից։ Հոդվածում շարադրված է նաև տուրբինի հանրահայտ քարակտերիստիկ կորերը վերահաշվելու և նրա անցման քարակտերիստիկ կորերն ստանալու մեթոդը։ Այս դեպքում անտես է առնվում ագրեգատի որևէ մասում գոյություն ունեցող ճնշման տատանում և հետևաբար նշված հավասարումը ընդունելի է հաստատուն էջքի առկայության պայմանների համար։*

Հոդվածում բերվում են տուրբինի ցանկացած քարակտերիստիկ կորը հաշվելու բանաձևեր, որոնք հնարավորություն են տալիս ստանալու նրա չհաստատված ռեժիմում ունեցած քարակտերիստիկ կորերը ցանկացած էջքի և չափերի դեպքում։ Բոլոր հաշվումները համեմատված են փորձերից ստացած արդյունքների հետ, որը ցույց է տալիս, որ արծարծված բանաձևերը ունեն բավարար ճշտություն և նրանք կարող են կիրառվել գործնական հաշիվներում։

ЛИТЕРАТУРА

1. *A. Aenot.* Turbines hydrauliques et regulateurs automatiques de vitesse. Paris. 1935.
2. *Асламазян А. А.* О характеристиках гидротурбин при переходных процессах НДВШ, „Энергетика" № 2, 1958.
3. *Асламазян А. А.* Энергетическое испытание турбин. „Известия АН Армянской ССР" (сер. техн. н.), № 3, 1959.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

ГИДРОТЕХНИКА

В. С. МАКАРОВА, А. М. МХИТАРЯН

ОПЫТЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МОНОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПЛЕНОК В ЦЕЛЯХ СОКРАЩЕНИЯ ИСПАРЕНИЯ, ПРОВЕДЕННЫЕ НА БЕРЕГУ ОЗ. СЕВАН

Проблема сокращения потерь воды на испарение из естественных и искусственных водоемов является актуальной и имеет важное значение для сельскохозяйственного производства, водообеспечения населенных пунктов и промышленных предприятий в южных засушливых районах СССР.

За рубежом в последние годы опубликовано значительное количество работ по этому вопросу [1, 2].

По инициативе Национального Комитета Союза ССР по ирригации и дренажу с 1960 г. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова (ВНИИГиМ) совместно с Государственным гидрологическим институтом, в содружестве с институтом Органической и физической химии АН СССР, Всесоюзным научно-исследовательским институтом жиров и Научно-исследовательским институтом синтетических жирозаменителей и моющих средств, начал исследования по сохранению испарения с водной поверхности методами химической защиты [3].

Институт энергетики и гидравлики АН Армянской ССР (ИнЭГ) обратился в Национальный Комитет и ВНИИГиМ с просьбой оказания помощи в постановке исследования по сокращению испарения с водной поверхности в Армении, где проблема разработки эффективных мероприятий по уменьшению испарения с водной поверхности и сохранению водных запасов естественных и искусственных водоемов стоит особенно остро.

В период с октября по ноябрь 1960 г. на водно-испарительной площадке экспериментальной базы ИнЭГ в Артанише, на берегу оз. Севан, были проведены исследования по сохранению испарения с водной поверхности с помощью мономолекулярных пленок. Целью исследований было выяснение эффективности различных средств химической защиты водной поверхности от испарения, их устойчивости во времени, сопротивляемости разрушению ветром и волнением, в условиях берега оз. Севан.

В экспериментальных работах приняли участие следующие сотрудники сектора Метеорологии-гидрологии ИнЭГ. Установку приборов, определение поверхностного натяжения воды, двухмерного давления монослоев и температуры воды в испарителях проводил Р. А. Аветисян; измерение испарения проводилось А. Г. Лазаряном; общие метеорологические наблюдения вели Р. М. Барсегян и В. Г. Татевосян; специальные актинометрические наблюдения на суше и над водноиспарительным бассейном площадью 20 $м^2$ с мономолекулярной пленкой и без нее проводил Г. Г. Пахчанян. Все указанные сотрудники приняли участие в обработке полученных материалов.

Сроки и объем экспериментальных работ были предусмотрены совместной рабочей программой исследований ВНИИГиМ и ИнЭГ АН Армянской ССР.

Ниже излагается объем исследовательских работ и полученные результаты.

Краткое описание водно-испарительной площадки и объем экспериментальных работ. Водно-испарительная площадка (рис. 1) расположена

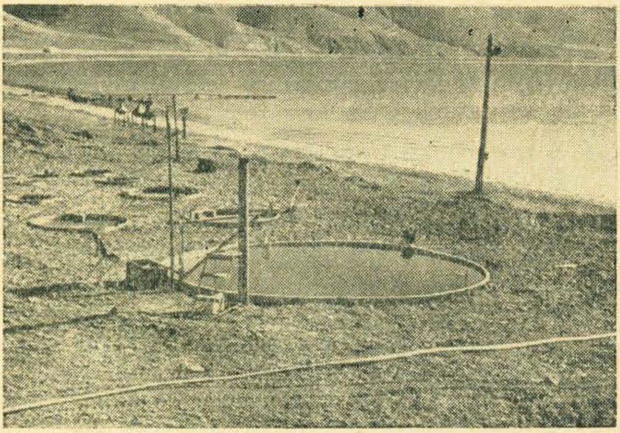


Рис. 1. Общий вид водно-испарительной площадки ИнЭГ со стороны берега.

на берегу Артанишского залива оз. Севан на территории, вышедшей из-под воды после спуска озера на 8—10 м и в виде перешейка протягивается с востока на запад между озером Севан и реликтовым озером площадью 0,4 $км^2$. Местность открытая, доступная воздушным потокам почти со всех сторон. С запада, севера, северо-востока на некотором расстоянии простираются горы Севанского хребта и его отроги. Значительная часть равнины возделывается под сельскохозяйственные культуры, остальная часть покрыта песками. Вблизи площадки отсутствуют строения, деревья и т. д.

На площадке размещено 17 испарителей, в том числе один водноиспарительный бассейн площадью 20 $м^2$ и глубиной 2 $м$ (см. табл. 1). Из восьми испарителей ГГИ-3000 два являются стандартными, заводского производства, окрашены и снабжены иглами для измерения уровня бюретками ГГИ, остальные шесть изготовлены на месте из оцинкованного железа, неокрашены и снабжены успокоителями, вынесенными за стенку испарителя в виде сообщающихся сосудов.

Для измерения скорости ветра на площадке установлена мачта с электроконтактными анемометрами на шести высотах 0,5; 1; 2; 4; 8 и 12 *м*. Скорость ветра регистрировалась на ленте с десятиминутными средними значениями одновременно на всех шести высотах, причем регистратор включался в течение часа в каждый данный срок наблюдений. Одновременно фиксировалось также и направление ветра. Осадки измерялись как наземным дождемером, входящим в комплект испарителя ГГИ-3000, так и обычным осадкомером. Влажность и температура воздуха измерялись аспирационным психрометром большой модели, установленном на высоте 2 *м*. Наблюдения велись также за облачностью.

Каждый испаритель был снабжен своим ртутным термометром, которым измерялась температура воды в испарителях, причем в водно-испарительном бассейне определялся также профиль температуры воды.

Специальные актинометрические наблюдения проводились как на суше, так и над водно-испарительным бассейном с мономолекулярной пленкой и без нее. В состав этих наблюдений входили измерения прямой и рассеянной радиации, альбедо поверхности, продолжительности солнечного сияния и радиационного баланса. На каждом испарителе был установлен специальный прибор для определения двухмерного давления монослоев. Проводился также комплекс метеорологических наблюдений по учащенной программе.

Характеристика метеорологических условий. В течение почти всего периода работ стояла ясная, сухая погода. Осадки были ниже нормы. Скорость ветра лишь за отдельные сроки доходила до характерных величин для данной местности. Ниже, на рис. 2 представлена роза ветров за указанный период работ. Как видно из рисунка, ветер в основном был береговым. Так, почти 73% всех случаев встречался ветер западного (27,2%), северо-западного (25,3%) и северного (19%) румбов. Ветер восточного румба и со стороны озера встречался значительно реже (4—5%) и лишь ветер юго-восточного румба встречался несколько чаще (9,5%),

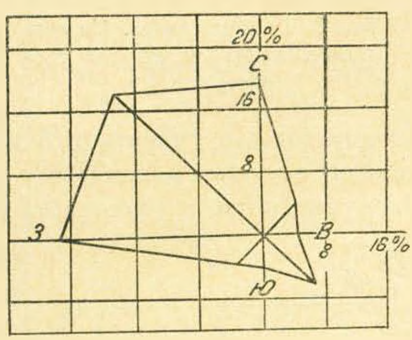


Рис. 2. Роза ветров.

На рис. 3 представлен профиль ветра в полулогарифмической шкале по интервалам скоростей. Здесь взяты средние часовые скорости ветра, причем профиль 0—1,9 м/сек построен как среднее из 80 случаев, 2—3,9 *м/сек* — из 56, 4—5,9 *м/сек* — из 20,6 *м/сек* и более — из 10 случаев. Как видно из рисунка, точки хорошо ложатся на прямые (коэффициенты корреляции больше 0,95), что и следовало ожидать, так как разность температур вода-воздух незначительна и условия стратификации в приземном слое атмосферы очень близки к равновесным. Отмечается зависимость параметра шероховатости от скорости ветра, особенно для малых скоростей. Характерная величина его имеет порядок 10^{-2} и 10^{-3} *м* на два порядка больше таковой для водной поверхности оз. Севан.

На рис. 4 представлен суточный ход скорости ветра и облачности. Суточный ход ветра достигает 2 *м/сек* и обнаруживает выраженный максимум в послеполуденные часы и минимум в ночные часы. Почти подобная картина отмечается и в суточном ходе облачности. На рис. 5 представлен суточный ход температуры и влажности воздуха.

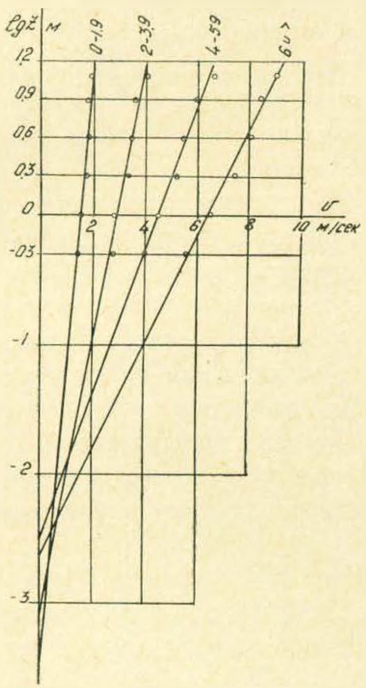


Рис. 3. Профиль ветра. На графике указаны интервалы скорости ветра.

Суточный ход упругости водяных паров незначителен, меньше

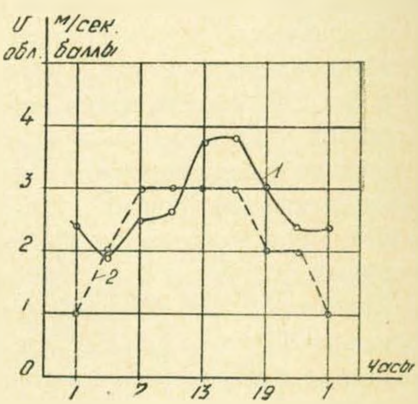


Рис. 4. Суточный ход скорости ветра — 1 и облачности — 2.

1 *мб* и имеет вид характерной двойной волны с главным максимумом в полдень и вторым максимумом—вечером. Минимум приходится на послеполуденные и ночные часы. Влажность в целом ниже нормы.

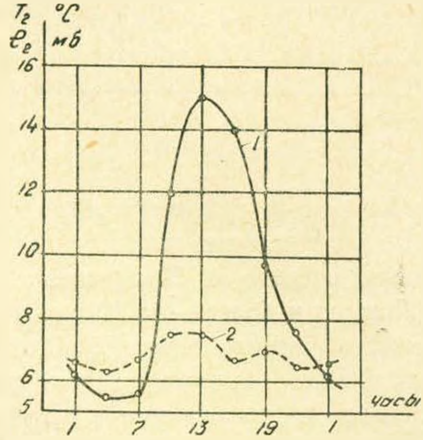


Рис. 5. Суточный ход температуры — 1 и влажности — 2 воздуха.

В табл. 2 приведен временной ход температуры и влажности воздуха, скорости ветра, облачности, осадков и температуры воды во всех испарителях за весь период работы. Здесь среднесуточные значения температуры и влажности воздуха, скорости ветра и облачности взяты по восьмисрочным наблюдениям, а по температуре поверхности воды в испарителях—по трехсрочным наблюдениям (7, 13, 19) для полной их синхронизации.

Как показывает таблица, средняя, за все время работ, температура

Таблица 1

Сведения о примененных химических веществах и испарителях

№№ исп.	Обозначение спиртов	Площадь исп. в $м^2$	Глубина исп. в м	Дата начала опытов	Состояние поверхности и вид вещества	Количество вещества в г	Дата добавок	Количество добавок в г	Дата окончания опытов	Примечание
1	$П_1$	0,3	0,65	16.X	Цетиловый спирт (импортный), кристаллы средней крупности	0.3	31.X	0,3	10 XI	
2	$П_2$	0,3	0,65	16.X	Октадециловый спирт (импорт.) кристаллы средней крупности	0,3	—	—	22.X	
3	$П_3$	0,3	0,65	16.X	Спирты из стеарина, кристаллы средней крупности	0,3	—	—	29.X	Испаритель снят
4	$П_4$	0,3	0,65	16.X	Гексадециловый спирт (импорт.) кристаллы средней крупности	0,3	31.X	0,3	10.XI	
5	$П_5$	0,3	0,65	16.X	Спирты из кашалотового жира, кристаллы средней крупности	0.3	—	—	10.XI	
6	$П_6$	0,3	0,65	16.X	Жирные спирты из вторых неомыляемых, полутвердые	0,3	31.X	0,3	10.XI	
7	$П_7$	0,3	0,65	16.X	Спирты из хлопкового масла, кристаллы средней крупности	0,3	—	—	10.XI	
8	—	0,3	0,65	16.X	Без покрытий	—	—	—	10.XI	Контрольный для 1—7
9	$П_7$	1,0	0,65	17.X	Спирты из хлопкового масла, кристаллы средней крупности	1,0	22.X	1,0	10.XI	
10	$П_6$	1,0	2,0	23.X	Жирные спирты из вторых неомыляемых, полутвердые	1,0	—	—	10.XI	
11	$П_7$	3,0	0,65	17.X	Спирты из хлопкового масла, кристаллы средней крупности	3,0	—	—	10.XI	
12	$П_6$	3,0	2,0	23.X	Жирные спирты из вторых неомыляемых, полутвердые	3,0	—	—	10.XI	
13	—	3,0	0,65	17.X	Без покрытий	—	—	—	10.XI	Контр. для 11
14	—	1,0	0,65	17.X	Без покрытий	—	—	—	10.XI	тоже для 9
15	—	1,0	2,0	23.X	Без покрытий	—	—	—	10.XI	тоже для 10
16	—	3,0	2,0	23.X	Без покрытий	—	—	—	10.XI	тоже для 12
17	$П_6$	20,0	2,0	23.X	Жирные спирты из вторых неомыляемых, полутвердые	20	—	—	10.XI	Испар. бассейн

воздуха составила 8,8°С, влажность воздуха — 7,2 *мб*, скорость ветра — 3,1 *м/сек*, а облачность — 3,8 балла. За тот же период работы выпало осадков 18,5 *мм*.

Применяемые химические вещества и приборы. При применении жирных спиртов для защиты водной поверхности от испарения мы исходили из следующих представлений о сущности процесса испарения при наличии мономолекулярной пленки на поверхности воды. Жирные спирты типа гексадеканоль, октодеканоль и другие, практически не растворимы в воде и образуют на ее поверхности бесцветные пленки толщиной в одну молекулу. Молекулы устанавливаются в ряд в вертикальном положении дискретно на поверхности воды. Такое распределение молекул и создает мономолекулярную пленку. При достаточном количестве вещества отдельные молекулы плотно притягиваются друг к другу, что создает препятствие для отрыва молекул воды от ее поверхности и тем самым уменьшает испарение.

Эффективность защиты водной поверхности от испарения мономолекулярной пленкой зависит от состояния данной пленки и, прежде всего, от ее плотности, которая характеризуется двухмерным давлением в монослое. Лучшие защитные свойства пленка имеет при двухмерном давлении близком к 40 *дин/см*. Характерной особенностью мономолекулярной пленки является то, что она не препятствует прохождению света и кислорода, не мешает выделению углекислоты и не нарушает нормальной жизни водоема. По физическим свойствам такая пленка эластична, упруга, повторяет формы водной поверхности и быстро восстанавливается при разрывах.

При настоящих исследованиях применялось семь видов жирных спиртов, четыре из которых получены по предложению советских ученых А. Д. Петрова, А. М. Трапезникова, Ф. В. Неволина, Г И. Никишина, Н. И. Маньковской, Б. С. Алаева, В. А. Огарева. Сведения об испарителях, примененных химических веществах, их количествах, периодах наблюдений и добавок приведены в табл. 1.

Как указывалось выше, эффективность защитных свойств мономолекулярных пленок зависит от двухмерного давления в слое. Для измерения поверхностного натяжения (двухмерного давления) при исследованиях применялся модернизированный для полевых условий вариант прибора конструкции А. А. Трапезникова, названного нами «динамером». Динамер состоит из динамометра в виде чувствительной вольфрамовой спирали, укрепленной вертикально с двухсторонним указателем на ее нижнем конце, к которому подвешена на стеклянном крючке слюдяная пластинка. Система динамометр-слюдяная пластинка помещена в прозрачный охранный цилиндр со шкалой на его внутренней поверхности. К нижней части цилиндра прикреплено латунное кольцо с прорезью, которое служит для защиты ответра погружаемой в воду слюдяной пластинки. Все устройство смонтировано на кронштейне, с помощью которого прибор крепится к борту испарителя. Динамометр каждого прибора градуируется.

Принцип работы прибора основан на определении разницы между поверхностным натяжением свободной поверхности воды и двухмерным давлением, образующимся при наличии спирта на водной поверхности. Слюдяная пластинка втягивается в воду силой поверхностного натяжения, которое при пуске спирта на воду понижается за счет образования двухмерного давления монослоя, вследствие чего погружение пластинки уменьшается.

Общий вид прибора показан на рис. 6.

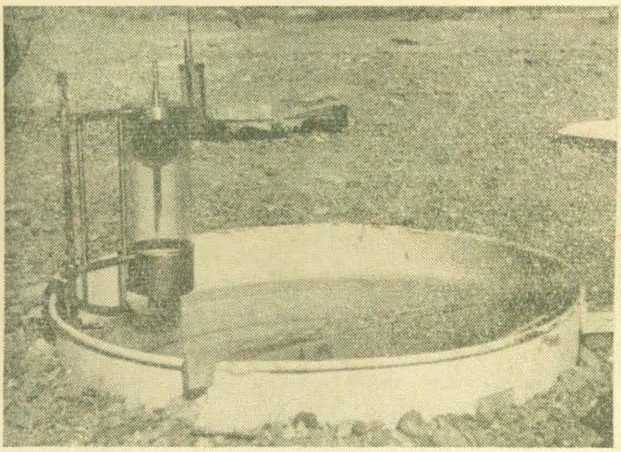


Рис. 6. Общий вид испарителя ГГИ-3000 с динамером и термометром.

Методика экспериментов. Как указывалось выше, исследования эффективности различных средств химической защиты водной поверхности от испарения проводились на испарителях, вкопанных в грунт, с высотой борта 7,5 *см* (табл. 1).

В целях обеспечения высокой точности эксперимента уровень воды в испарителях поддерживался на определенной высоте, для чего ежедневно в утренний срок наблюдений производились доливка или отливка воды до нужной отметки. В восьми испарителях с пленками и в испарительном бассейне доливка и отливка осуществлялись через успокоители во избежание нарушения пленок. В трех испарителях, не имеющих успокоителей, доливка и отливка воды производились непосредственно в испаритель. Кроме испарения, измерялись осадки, а также проводился полный комплекс круглосуточных восьмисрочных метеорологических и актинометрических наблюдений. Результаты наблюдений приведены в табл. 2. Температура воды определялась в слое 1 *см* с помощью постоянно установленных термометров от аспирационного психрометра большой модели в период с 17 октября по 1 ноября с 7 до 19 ежечасно и с 2 по 10 ноября в 7, 13 и 19 часов. Систематические наблюдения велись также за поверхностным натяжением воды и двухмерным давлением монослоев, с величиной которых связана эффективность последних. В период с 17 октября по 2 ноября эти наблюдения велись ежечасно с 7 до 19 часов.

Химические вещества применялись в порошкообразном виде в количестве 1 *г* вещества на 1 $м^2$ водной поверхности с производством добавки в таком же количестве в случае заметного уменьшения двухмерного давления спиртов.

Специальные наблюдения велись за созданием в опытных установках монослоев применяемыми видами жирных спиртов. В этом случае до нанесения спиртов по динамеру определялось поверхностное натяжение воды. Вещество наносилось на водную поверхность простой засыпкой и по шкале прибора фиксировалось уменьшение поверхностного натяжения воды и рост двухмерного давления спиртов через 15, 30, 60 секунд, 2, 4, 8, 16, 32, 60 минут и т. д. до тех пор пока рост не прекращался. Эти наблюдения дали возможность выяснить скорость создания монослоя и наибольшую величину его двухмерного давления.

Результаты исследований. Наблюдения над испарением с испарителей с мономолекулярными пленками и без них показали, что пленки из различных спиртов по разному влияют на испарение. Суммарные данные об

Таблица 2

Средние суточные значения метеоэлементов и температуры воды в испарителях

Дата	Т-ра воздуха, °C	Влажность, *мб*	Скорость ветра, *м/сек*	Температура воды в испарителях, C							
				1	2	3	4	5	6	7	8
16.X	9,7	8,2	4,7	—	—	—	—	—	—	—	—
17.X	11,0	7,5	1,7	13,0	11,5	11,4	—	13.2	12,7	13,0	11,5
18.X	10,1	6,7	2,8	12,8	11,3	11,4	13,6	13,7	12,7	12,6	11,4
19.X	11,4	7,5	2,1	—	—	—	—	12,9	—	12,1	11,4
20.X	12,3	7,2	6,0	12,9	11,0	11,2	13,1	13.3	12,4	11,6	11,1
21.X	6,8	7,4	3,1	10,0	9,5	9,3	10,1	10.6	10,0	9,5	9,1
22.X	7,2	7,4	2,3	9,9	—	9,6	9,9	10,9	10,0	9,4	9,0
23.X	7,8	7,1	2,9	9,8	9,6	9,4	9,6	10,8	10,1	10,7	8,8
24.X	8,3	5,9	3,8	9,3	7,9	8,5	9,0	10,7	8,5	9,4	7,7
25.X	7,9	6,2	2,2	9,9	8,9	9,3	9,8	7,6	9,1	9,8	8,7
26.X	10,9	7,0	3,3	10,7	9.0	9,4	9,6	11,5	9,4	9,7	8,9
27.X	11,3	7,0	2,7	12,1	10,1	10,7	11,1	12,5	10,8	10,6	9,5
28.X	9,8	6,8	2,1	11,0	9,8	10,3	0,6	11,9	10,4	10,4	9,7
29.X	9,8	6,1	2,8	10,0	9,7	—	9,6	11,2	9,2	9,4	9,0
30.X	9,9	6,9	2,2	10.6	9,5	9,7	10,2	11,7	9,6	10,3	9,3
31.X	9,4	7,5	2,5	10.9	9,3	9,9	9,8	11,9	9,7	10,2	9,1
1.XI	8,1	6,6	1,9	9,9	8,7	—	9,7	10.7	9,4	9,6	8,6
2.XI	8,4	6,[illegible]	1,6		—	—	—	—	—	—	—
3.XI	9,1	7,5	1,9	10.6	9,8	9,7	10,6	10,9	10.2	10,1	9,7
4.XI	11,9	7.9	4,5	10,1	9,7	9,5	0,4	10,1	10,3	9,5	9,6
5.XI	8,0	8,2	2,7	10,5	9,6	9,[illegible]	10,6	10,9	10,4	9,6	9,6
6.XI	6,6	8,8	3,1	9,7	9,0	9,1	9,2	9.8	9,8	9,2	9,0
7.XI	5,1	7,6	6,1	8,5	7,5	7,5	8,5	8,4	8,5	7.4	7,5
8.XI	4,3	7,1	5,1	7,9	7,1	6.9	8,0	8,3	7,9	6,9	6,7
9 XI	3,9	6,0	3,1	7,9	6,7	6,7	8,2	8,0	7,7	6,3	5,4
Ср.	8,8	7,2	3,1	10,4	9,3	9,0	10,1	10,9	9.9	9,9	9.1

уменьшении испарения различными пленками на различных испарителях за весь период работы данной группы испарителей приведено ниже, в табл. 3.

На рис. 7 представлено суммарное испарение испарителей с пленками $П_1$—$П_7$ с соответствующей их нумерацией, а также контрольного для них испарителя—8, на рис. 8—для остальных испарителей. В табл. 3 указаны

Продолж. табл. 2

Дата	Облачность, баллы	Осадки, *мм*	Температура воды в испарителях, °C								
			9	10	11	12	13	14	15	16	17
16.X	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17.X	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18.X	0	—	14,1	—	13,0	—	11,2	11,5	—	—	—
19.X	2	—	12 9	—	13,5	—	11,5	11,4	—	—	—
20.X	7	0,5	12,4	—	—	—	10,7	11,2	—	—	—
21.X	7	9,3	9,6	—	10,4	—	9,2	9,3	—	—	—
22.X	3	—	9,8	—	10,1	—	9,3	10,2	—	—	—
23.X	3	0,4	10,6	—	10,3	—	9,7	9,2	—	—	—
24.X	2	—	—	11,2	8,7	10,5	8,4	8,3	8,9	9,3	9,8
25.X	2	—	10,6	11,9	10,1	11,4	9,3	9,3	9,7	10,0	10,5
26.X	3	—	10,1	12,2	9,5	10,7	9,0	9,4	9,9	10,2	9,9
27.X	1	—	11,0	13,3	10,3	12,4	10,3	10 6	10,9	10,9	11,0
28.X	4	—	10,3	12,1	10,0	11,8	10,0	10,2	10,5	10,6	10,6
29.X	2	—	9,6	11,7	9,1	10,7	9 6	9,7	9,6	9,9	9,5
30.X	0	—	10,0	11,2	9,6	11,7	9,9	10,0	10,1	10 4	10,4
31.X	1	—	9,8	11,0	10,0	11,6	9,9	9,8	10,2	10,3	10,3
1.XI	5	—	9,2	10,0	9,0	10,1	9,1	9,1	9,2	9,6	9,7
2.XI	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.XI	8	—	9,8	10,5	9,6	10,4	9,4	10,0	9,9	10,1	10,0
4.XI	8	2,1	9,6	10,1	9,2	9,9	9,2	9,7	10,0	9,6	9,2
5.XI	9	—	9,5	10,1	9,4	10,0	9,4	9,5	9,8	9,8	9,5
6.XI	9	6,2	9,1	9,4	8,8	9,4	8,8	8,9	9,2	9,3	8,8
7.XI	8	—	7,5	8,1	7,5	8,3	7,2	7,0	8,1	8,5	7,8
8.XI	3	—	6,7	7,7	5,7	7,6	6,2	6,5	7,6	7,7	7,2
9.XI	1	—	5,6	7,5	5,6	7,3	5,5	5,3	7,6	7,5	6,8
Ср.	3,8	18,5	9,9	10,5	9,5	10,2	9,2	9,4	9,4	9,6	9,4

также испарители без покрытий, являющихся контрольными для соответствующего ему по размерам испарителя с мономолекулярной пленкой, номер которой также указан в этой таблице.

Графики на рисунках 7 и 8 и табл. 3 показывают следующее.

Уменьшение испарения за счет воздействия мономолекулярных пленок для различных видов примененных веществ составило от 3,6% до 61,9%. Наибольшее в данных опытах эффективное воздействие оказали пленки спирта из кашалотового жира ($П_5$) — 62%, цетилового спирта, импортного ($П_1$) — 47%, спиртов из вторых неомыляемых ($П_6$) — 38%.

В отдельные сутки испарение с испарителей, покрытых пленками $П_1$, $П_5$ и $П_6$ уменьшалось от 70 до 99%, причем суточное испарение по контрольному испарителю было достаточно большим (2—3 *мм*). Ход испарения для всех испарителей наглядно представлен на графиках. На рис. 8 показан ход испарения по водно-испарительному бассейну (17), по которому наблюдения с пленкой начаты позже и потому вся кривая расположена ниже остальных. За неимением контрольного бассейна, здесь соответствующее сравнение не проведено. Далее, на рис. 9 представлен временной ход температуры поверхности воды для испарителей с пленками $П_1$, $П_5$ и $П_6$ и контрольного к ним — 8. Эти данные относятся к сроку

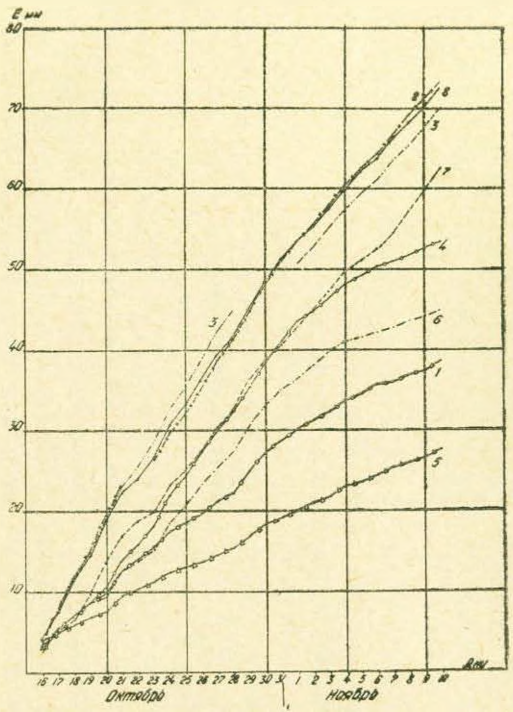


Рис. 7. Интегральная кривая испарения для испарителей 1—8. На графике указаны номера испарителей и монослои по табл. 1.

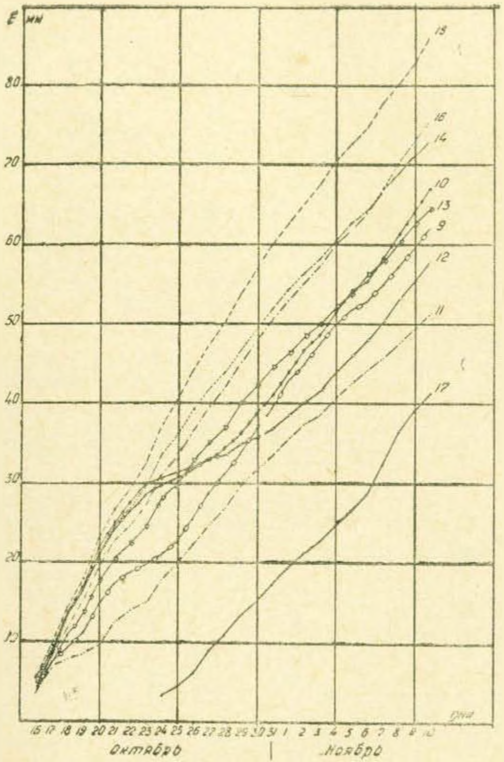


Рис. 8. Интегральная кривая испарения для испарителей 9—17. На графике указаны номера испарителей и монослои по табл. 1.

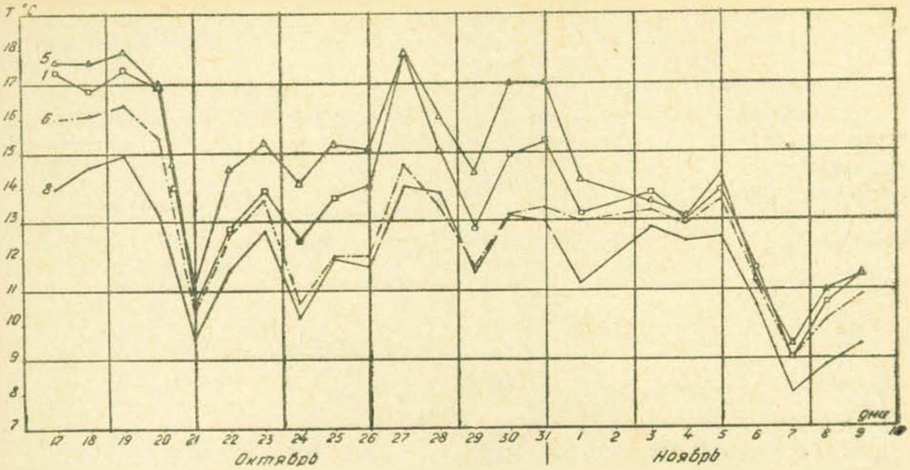


Рис. 9. Временной ход температуры поверхности воды за 13 часов в испарителях: 1—с пленкой—$П_1$; 5—с пленкой $П_5$; 6—с пленкой $П_6$; 8—контрольный, без покрытий.

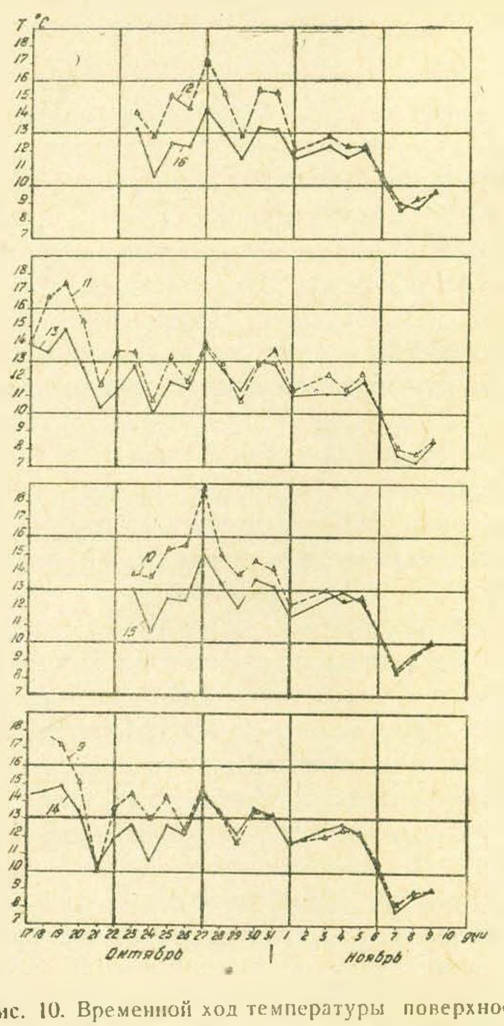


Рис. 10. Временной ход температуры поверхности воды в испарителях: номера по табл. 1.

Таблица 3

Результаты наблюдений над испарением и экономия испарения мономолекулярными пленками в % по отношению к контрольным

Обозначение спиртов и №№ испарителей	Сумма испарения в *мм*	Сокращение испарения		Примечание
		в *мм*	в %	
$П_1$—1	38,5	34,0	46,9	
$П_2$—2	73,2	—	—	Испаритель
$П_3$—3	69,9	2,6	3,58	с 22.X снят
$П_4$—4	53,3	19,2	26,5	
$П_5$—5	27,6	44,9	61,9	
$П_6$—6	44,9	27,6	38,1	
$П_7$—7	62,5	10,0	13,8	
—8	72,5	—	—	Контрольный для испарителей 1—7
$П_7$—9	62,2	10,9	14,9	
$П_6$—10	67,1	19,2	22,2	
$П_7$—11	51,3	13,2	20,5	
$П_6$—12	58,0	47,6	23,3	
—13	64,5	—	—	Контрольный для исп. 11
—14	73,1	—	—	„ „ „ 9
—15	86,3	—	—	„ „ „ 10
—16	7,56	—	—	„ „ „ 12
—17	41,3	—	—	Контрольного бассейна не было

наблюдений в 13 часов и приведены лишь для тех спиртов, пленки из которых дали наибольший эффект.

На рис. 10 представлен ход температуры поверхности воды для четырех пар испарителей за тот же срок — 13 часов, причем в каждую пару входит испаритель с соответствующей пленкой (см. табл. 3) и его контрольный. Более подробные данные о температуре воды приведены в табл. 2, где средние значения выведены по трехсрочным наблюдениям, в 7, 13 и 19 часов.

Как показывают графики и табл. 2, температура воды под пленками со значительным сокращением испарения, на 1—2°C выше, чем в контрольных. Так, например, за все время наблюдений средняя температура воды в контрольном испарителе 8 составила 9,1°C, в то время, как в испарителях с $П_6$—9,9, с $П_1$—10,4 и с $П_5$—10,9°C.

Еще более велика разность за отдельные сроки наблюдений, как это видно из графиков, особенно в первый период работы, или сразу, после добавки вещества. Для тех же испарителей со спиртами, мономолекулярные пленки которых дали незначительный эффект, температура воды мало отличается или почти не отличается от таковой для контрольного.

Специальные наблюдения за скоростью создания монослоя в опытных установках и систематические измерения двухмерного давления показали, что время образования мономолекулярной пленки на водной поверхности различными веществами, наибольшая установившаяся величина двухмерного давления и время сравнительно стабильного состояния монослоя далеко не одинаковы.

Некоторые наиболее характерные данные этих наблюдений приведены ниже, в табл. 4.

Таблица 4

Данные о времени образования монослоя, стабильного его состояния и наибольшего двухмерного давления

Вид пленки и № испарителя	Время образования монослоя в минутах	Время сравнительно стабильного состояния монослоя в часах	Наибольшая величина двухмерного давления, *дин/см*
$П_1$ — 1	8	281	42,12
$П_2$ — 2	2520	105	23,63
$П_3$ — 3	1020	105	19,18
$П_4$ — 4	60	249	46,68
$П_5$ — 5	2	401	43,50
$П_6$ — 6	8	401	33,36
$П_7$ — 7	8	57	20,55
$П_7$ — 9	8	225	33,60
$П_7$ —11	8	149	35,37
$П_6$ —10	2	238	35,00
$П_6$ —12	4	238	27,80
$П_6$ —17	1	230	45,12

Наибольшей скоростью распространения монослоя обладают спирты из вторых неомыляемых ($П_6$), спирты, полученные из кашалотового жира ($П_5$) и хлопкового масла ($П_7$). Максимальные установившиеся значения двухмерного давления оказались для мономолекулярных пленок из вторых неомыляемых ($П_6$) — 45,12 *дин/см*, гексадецилового спирта, импортного ($П_4$) — 46,68 и спиртов, полученных из кашалотового жира ($П_5$) — 43,50. С течением времени величина двухмерного давления уменьшалась. Наибольшая стабильность монослоя по времени оказалась у спиртов, полученных из кашалотового жира ($П_5$) и вторых неомыляемых, у которых монослой был сравнительно стабильным в течение всего периода исследований. В испарителях, где двухмерное давление монослоев уменьшалось, 31/X были сделаны добавки веществ (табл. 1). С точки зрения сохранности пленки наилучшие результаты получены в опытах со спиртом из кашалотового жира ($П_5$) и вторых неомыляемых ($П_6$). Наименее устойчивыми оказались пленки жирных спиртов, полученных из стеарина, октодецилового спирта (импортного) и спиртов, полученных из хлопкового масла.

Специальные актинометрические наблюдения проводились на площадке, где подстилающая поверхность — пески и параллельно над водно-испарительным бассейном без пленки, а затем с пленкой $П_6$.

До пуска вещества в течение пяти суток с хорошей ясной погодой проводились учащенные синхронные наблюдения над альбедо подстилающей поверхности. Среднее за все это время значение альбедо составило для суши $A = 0{,}21$, а для водно-испарительного бассейна без пленки $A = 0{,}13$. После пуска вещества и образования монослоя $П_6$, подобные наблюдения проводились в течении пяти суток с примерно такими же погодными условиями.

Последнее подтверждается тем, что среднее за вторую пятидневку значение альбедо для суши, $A = 0{,}207$, почти полностью совпадает с его значением за первую пятидневку. Что касается водно-испарительного бассейна с монослоем $П_6$, то здесь оказалось $A = 0{,}13$, т. е. полностью совпадает с его значением для чистой воды. Это означает, что пленка по крайней мере не увеличивает отражательную способность водной поверхности.

Заключение. Результаты исследований, которые являются предварительными и неполными вследствие ограниченности периода наблюдений, недостаточного оборудования и оснащенности площадки, отсутствия необходимого количества спиртов и опыта работы с ними, можно считать обнадеживающими. Это особенно касается монослоев из спиртов кашалотового жира, цетилового и из вторых неомыляемых. На основании полученных результатов составлена программа совместных экспериментальных и полевых работ на 1961 г.

Важнейшими задачами являются исследования механических свойств мономолекулярных пленок, создаваемых различными веществами в зависимости от скорости ветра и амплитуды волны, устойчивости во времени и сопротивляемости монослоев разрушениям ветром и волнением; определение расхода минимального количества вещества на единицу поверхности воды, достаточного для создания необходимого эффекта сокращения испарения; разработка простого способа подачи вещества на большие поверхности и т. д.

Все указанные задачи и ряд других входят в указанную выше согласованную программу дальнейших комплексных исследований.

Վ. Ս. ՄԱԿԱՐՈՎԱ, Ա. Մ. ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ

ԳՈԼՈՐՇԻԱՑՈՒՄԸ ԿՐՃԱՏԵԼՈՒ ՆՊԱՏԱԿՈՎ ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ԱՓԻՆ ՄԻԱՄՈԼԵԿՈՒԼՅԱՐ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ՈՒՂՂՈՒԹՅԱՄԲ ԿԱՏԱՐՎԱԾ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԸ

Ամփոփում

Սևանա լճի Արտանիշ ծոցի ափին ստեղծված ջրա-գոլորշիացման հատուկ հրապարակում 1960 թ. աշնանը փորձարկվել են 7 տեսակի մակերեսային ակտիվ նյութեր-սպիրտներ, որոնք ջրի ազատ մակերևույթի վրա առաջացնում են միամոլեկուլյար թաղանթներ։ Դրանց առկայությունը հաստատվում է հատուկ գործիքով—«դինամերով», որը չափում է թաղանթի մակերեսային լարվածությունը։ Երբ թաղանթն ստեղծված է, նրա մակերեսային լարվածությունը բավականաչափ մեծ է, նա բերում է ջրի գոլորշիացման զգալի կրճատմանը։ Փորձերը դրվել են բնական պայմաններում (քամի, անձրև և այլն), հողի մեջ տեղադրված գոլորշիացնողներում։ Միևնույն չափերն ունեցող գոլորշիացնողներում փորձարկվել են տարբեր տեսակի թաղանթներ. իսկ տարբեր տիպի գոլորշիացնողներում՝ միևնույն նյութից ստացված թաղանթները։ Միաժամանակ նույն տիպի գոլորշիացնողների վրա ևս կատարվել են դիտումներ մաքուր ջրի դեպքում առանց թաղանթի, համեմատությունների համար։

Ստացված արդյունքները բերվում են հոդվածում աղյուսակների ձևով։ Որոշ արդյունքներ զետեղված են գծագրերի վրա։ Նրանք ցույց են տալիս հետևյալը։

Կաշալոտի ճարպից ստացված սպիրտի թաղանթը կրճատում է գոլորշիացումը 62%, հեքսադեկանոլը՝ 47% և այլն։ Ջրի ջերմաստիճանը թաղանթի առկայության դեպքում 1°—2° ավելի է, քան մաքուր ջրինը։ Այդ տարբերությունն այնքան մեծ է, որքան շատ է գոլորշիացման կրճատումը։

Տարբեր նյութեր վարդացած թաղանթ առաջացնում են տարբեր ժամանակում։ Անձրևի դադարումից որոշ ժամանակ անց քայքայված թաղանթը նորից վերականգնվում է ինքն իրեն։

Փորձերի արդյունքները թույլ են տալիս հուսալու, որ թաղանթների օգնությամբ հնարավոր կլինի հասնել գոլորշիացման զգալի կրճատման։ Այդ նպատակով տարվող փորձարկումները շարունակվում են։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егиазаров И. В.* Возможность значительной экономии водных ресурсов для народного хозяйства и мономолекулярная защитная пленка для борьбы с испарения ми с поверхности водоемов, озер и водохранилищ. 1-ое сообщение. Изв. АН АрмССР, сер. ТН, т. XIII, 3, 1960.
2. *Егиазаров И. В.* То же. 2-ое сообщение. Изв. АН АрмССР, сер. ТН, т. XIII, 6, 1960.
3. *Макарова В. С.* Применение мономолекулярных пленок для уменьшения потерь с водной поверхности на испарение. Журнал „Гидротехника и мелиорация", № 11, 1950.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. Г. АЗИЗЯН, Р. А. МЕЛИКЯН, Н. И. СМИРНОВ

ГИДРОДИНАМИКА БАРБОТАЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

Сообщение 2. Вывод расчетных уравнений для массового всплывания пузырьков газа в среде жидкости при барботажном и смешанном режимах

В предыдущем сообщении [1] нами были опубликованы результаты изучения скорости массового всплывания пузырьков газа в среде жидкости в зависимости от различных факторов, действующих на эту скорость; там же был дан краткий обзор работ других авторов, касающихся этого вопроса. Было отмечено, что пока не достигнуты результаты, позволяющие иметь количественные расчетные уравнения, удобные для пользования; это является конечной целью выполненных нами работ. Одним из авторов настоящей работы [2] дана гидродинамическая классификация режимов, возникающих в этом процессе, согласно которой возможны: 1) барботажный режим, 2) смешанный барботажно-струйный режим, 3) пенный режим, 4) струнный режим.

Существование того или иного режима зависит от скорости подаваемого газа, причем наступление пенного режима было еще ранее количественно определено М. Е. Позиным и др. [3] в виде:

$$\frac{\gamma_c - \gamma}{\gamma_c - \gamma_в} = 0{,}5, \qquad (1)$$

где γ_c — удельный вес среды (жидкости);

$\gamma_в$ — удельный вес воздуха (газа);

γ — удельный вес газожидкостной смеси.

Р. А. Меликяном [2] точки перехода даны в виде:

$$\frac{h}{H} \leq 0{,}5 \text{ или } (W_{см})_{крит} \leq (W_s)_{ср}, \qquad (1а)$$

где h — начальная высота слоя жидкости;

H — высота газожидкостного столба;

$W_{см}$ — скорость газожидкостного потока;

$(W_s)_{ср}$ — средняя по высоте слоя жидкости скорость всплывания пузырьков газа.

Однако эти уравнения не позволяют заранее рассчитать точки перехода от одного режима к другому, так как опыты показали, что значения γ, H и $(W_s)_{cp}$ зависят от многих факторов. То же самое относится к уравнению

$$(W_s)_{cp} = W_{cм} \cdot \frac{h}{H-h} \cdot \qquad (2)$$

В настоящей работе мы задались целью вывести критериальные уравнения, учитывающие влияние различных факторов процесса, для расчета $(W_s)_{cp}$ и H в областях барботажного и смешанного режимов, а также критериальное уравнение, определяющее переход от первого ко второму, так как эти режимы наиболее часто встречаются на практике. Как ниже будет показано, ввиду сложности процесса, переход от одного гидродинамического режима к другому зависит не только от величины критерия Рейнольдса, но также и от других критериев.

Вывод критериальных уравнений базируется на экспериментальных данных, опубликованных в предыдущем сообщении [1]. В упомянутых экспериментах было показано, что скорость всплывания газа зависит от начального слоя жидкости h, диаметра отверстия распределительной тарелки d_0, числа отверстий тарелки n, диаметра колонны D, характера жидкости и скорости газожидкостной смеси. К этим величинам можно добавить также характеризующий свойства газа удельный вес *$\gamma_в$, диаметр распределительной тарелки d_1, так как не во всех случаях он совпадает с диаметром колонны. В этих случаях среднее для данного слоя жидкости значение диаметра колонны определялось по уравнению:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi h}}, \qquad (3)$$

где V — объем заливаемой жидкости.

Перечисленные величины достаточны для количественного описания скорости всплывания газа в исследуемых двух режимах. Что касается величины и концентрации пузырьков, то как ранее отмечалось [1] они зависят от диаметра и числа отверстий распределительной тарелки, скорости прохождения газа через отверстия, высоты слоя и характера жидкости. Поэтому отсутствие величин диаметра и концентрации пузырьков не мешает количественному определению $(W_s)_{cp}$ и H. Кроме того в изучаемых режимах размер и концентрация пузырьков переменны по высоте слоя и не поддаются измерению, поэтому если бы эти величины входили в расчетные уравнения, то последние стали неудобными для применения.

Таким образом средняя скорость всплывания пузырьков газа $(W_s)_{cp.}$ и высота газожидкостного столба H оказываются функциями следующих величин:

---

* Вязкость пропускаемого газа (воздуха) не оказывает существенного влияния [4].

$$(W_s)_{ср.} = f(W_{см},\ h,\ d_0,\ D,\ d_1,\ n,\ \gamma_c,\ \gamma_в,\ \mu_c,\ \sigma) \qquad (4)$$

$$H = f_1(W_{см},\ h,\ d_0,\ D,\ d_1,\ n,\ \gamma_c,\ \gamma_в,\ \mu_c,\ \sigma), \qquad (5)$$

где μ_c — вязкость жидкости,

σ — поверхностное натяжение на границе фаз.

В уравнениях (4) и (5) все величины легко поддаются измерению, число переменных равно 11, а выражены они с помощью трех единиц измерения (*кг, м, сек*). Следовательно, на основании П-теоремы теории размерностей зависимость между этими переменными должна выражаться (11—3) восемью критериями, которые найдены с помощью обычных приемов теории размерностей* [6].

Нахождение первого критерия, в который должна войти вычисляемая величина, очевидно: это должно быть отношение скоростей $\frac{(W_s)_{ср}}{W_{см}}$ или отношение высот $\frac{h}{H}$. Мы можем принять:

$$\Pi_1 = \frac{(W_s)_{ср}}{W_{см}} + 1 = \omega \qquad (6)$$

и

$$\Pi_1' = 1 - \frac{h}{H} = \varepsilon, \qquad (7)$$

так как применение критерия $1 - \frac{h}{H} = \varepsilon$ распространено, а для получения аналогичного критерия, выраженного в скоростях, мы примем $\frac{(W_s)_{ср}}{W_{см}} + 1 = \omega$, причем $\omega = \frac{1}{\varepsilon}$.

Второй критерий — Рейнольдса:

$$\Pi_2 = \frac{d_0 \cdot W_d \cdot \gamma_c}{\mu_c \cdot g} = Re.$$

Здесь W_d — скорость газа в свободном сечении распределительной тарелки, которая вместе с диаметром отверстия d_0 обуславливает размер образующихся пузырьков. Применение W_d вместо $W_{см}$ не противоречит условиям П-теоремы, так как:

$$W_d = W_{см} \cdot \frac{F}{f} = W_{см} \cdot \frac{\pi D^2}{n \cdot \pi d_0^2}. \qquad (8)$$

Третий критерий — Архимеда:

$$\Pi_3 = \frac{d_0^3 \cdot \gamma_c^2 \cdot (\gamma_c - \gamma_в)}{\mu_c^2 \cdot g \cdot \gamma_в} = Ar.$$

---

* Сущность нахождения сводится к решению системы трех уравнений с 11-ю неизвестными, где неизвестными являются показатели степеней размерностей: *кг, м, сек*. Учитывая условия опытов можно решить эти уравнения и определить показатели степеней размерностей, переменные которых и составляют в каждом случае определенный безразмерный критерий.

Четвертый критерий — Вебера:

$$\Pi_4 = \frac{\sigma}{d_0 \cdot \gamma_c} = We.$$

Пятый, шестой, седьмой и восьмой критерии представляют критерии геометрического подобия, подобранные так, чтобы учитывать влияние конструкции аппаратуры:

$$\Pi_5 = \frac{d_0}{h} = \Gamma_1;\ \Pi_6 = \frac{d_0}{D} = \Gamma_2^1;\ \Pi_7 = \frac{f}{F} = \frac{n \cdot \pi d_0^2}{\pi D^2} = \Gamma_4;\ \Pi_8 = \frac{D}{d_1} = \Gamma_3.$$

Таким образом должны иметь место следующие соотношения:

$$f(\omega,\ Re,\ Ar,\ We,\ \Gamma_1,\ \Gamma_2',\ \Gamma_3,\ \Gamma_4) = 0; \quad (9)$$

$$f_1(\varepsilon,\ Re,\ Ar,\ We,\ \Gamma_1,\ \Gamma_2^1,\ \Gamma_3,\ H_4) = 0. \quad (9a)$$

Задача сводится к установлению математического вида этих зависимостей. Мы приняли в качестве исходной следующую функцию, показатели которой подлежат подбору по имеющимся опытным данным.

$$\omega = a \cdot Re^x \cdot Ar^y \cdot We^z \cdot \Gamma_1^l \cdot (\Gamma_2')^k \cdot \Gamma_3^m \cdot \Gamma_4^n; \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{a} \cdot Re^{-x} \cdot Ar^{-y} \cdot We^{-z} \cdot \Gamma_1^{-l} \cdot (\Gamma_2')^{-k} \cdot \Gamma_3^{-m} \cdot \Gamma_4^{-n}. \quad (10a)$$

Для определения показателей степеней и коэффициентов уравнений (10 и 10а) был использован графический метод, наиболее удобный для обработкк имеющихся опытных данных. Сущность метода сводится к нахождению зависимости между двумя величинами при постоянстве других |5, 9|. При этом все постоянные могут быть введены в коэффициенты уравнения (10), которое примет вид:

$$\omega = A \cdot Re^x.$$

Откладывая в координатах ω — Re по логарифмической шкале эти величины и соединяя все точки, получим в данном случае прямую, тангенс угла наклона которой будет численно равен показателю степени x. Коэффициент уравнения легко определится:

$$A = \frac{\omega}{Re^x}.$$

Затем выбираем группы опытов с разными величинами Γ_1 (при постоянстве для каждой группы остальных величин) и аналогичным образом находим коэффициент и показатель степени уравнения

$$A = B \cdot \Gamma_1^l.$$

Так продолжается до нахождения всех показателей степеней и коэффициентов уравнений (10) и (10а). Аналогично устанавливается число гидродинамических режимов, подчиняющихся различным количественным закономерностям. Для этого строим в логарифмической шкале зависимости

$$\frac{(W_s)_{\text{ср}}}{W_{\text{см}}} = f(Re_{\text{см}}) \text{ и } \varepsilon = f_1(Re_{\text{см}})$$

(рис. 1 и 2 для группы опытов с распределительной тарелкой № 7 в колонне $D = 0{,}076$ *м*, жидкость — вода). Здесь критерий Рейнольдса рассчитан (в отличие от применяемой ранее величины* Re) для газожидкостной смеси:

$$Re_{\text{см}} = \frac{D \cdot W_{\text{см}} \cdot \gamma_c}{\mu_c \cdot g},$$

что сделано для удобства сравнения рисунков 1 и 2 с кривыми $W_{\text{см}} - (W_s)_{\text{ср}}$, приводимыми в предыдущем сообщении. Рисунки 1 и 2 четко указывают на излом линий, т. е. на изменение показателя сте-

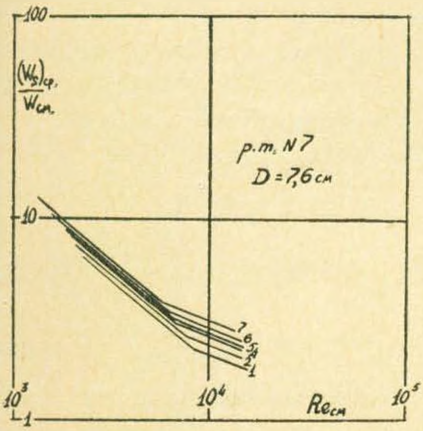


Рис. 1.

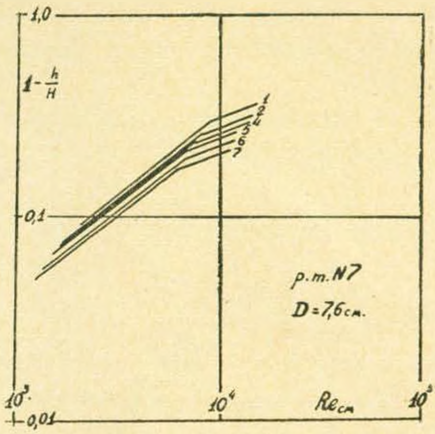


Рис. 2.

пени критерия Рейнольдса. Это изменение соответствует таким скоростям газожидкостной смеси $W_{\text{см}}$, при которых кривые (см. сообщение 1), построенные в координатах $W_{\text{см}} - (W_s)_{\text{ср}}$. имеют минимум [1]. Таким образом, высказанное в предыдущем сообщении мнение о том, что в точках минимума кривых наступает переход барботажного режима в смешанный (барботажно-струйный) можно считать количественно подтвержденным.

На рис. 1 и 2 в области перехода от барботажного режима к смешанному (т. е. в месте излома линии) экспериментальные точки отклоняются от линий (рис. 3). Это может быть объяснено тем, что переход от данного режима к другому происходит постепенно и разновременно по высоте газожидкостного столба [1].

В ходе решения задачи выяснилось, что критерии геометрического подобия Γ_2 и Γ_4 имеют показатель степени, отличающийся лишь знаком, но одинаковый по величине, что позволило их объединить в один критерий:

---

* При рассчетах Re и $Re_{\text{см}}$ везде берется вязкость жидкости, так как вязкость газа не оказываетсущественного влияния [4] и по величине намного меньше вязкости жидкости. То же самое относится и к величине удельного веса.

$$\Gamma_2^{0,85} = (\Gamma_2^1)^{-0,85} \cdot \Gamma_4^{0,85} = \left(\frac{D}{d_0} \cdot \frac{n \cdot \pi d_0^2}{\pi D^2}\right)^{0,85} = \left(\frac{n d_0}{D}\right)^{0,85}. \quad (11)$$

После определения значений всех показателей и коэффициентов, уравнения принимают следующий вид:

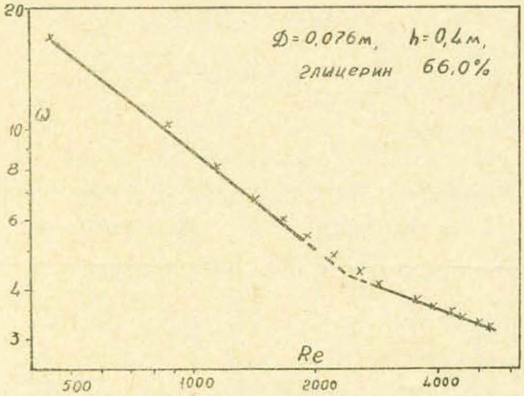


Рис. 3.

Для барботажного режима:

$$\omega = 0,475\ Re^{0,8} \cdot Ar^{0,45} \cdot We^{0,2} \cdot \Gamma_1^{-0,24} \cdot \Gamma_2^{-0,85} \cdot \Gamma_3 \quad (12)$$

или

$$\varepsilon = 2,1 \cdot Re^{0,8} \cdot Ar^{-0,45} \cdot We^{-0,2} \cdot \Gamma_1^{0,24} \cdot \Gamma_2^{0,85} \cdot \Gamma_3^{-1}. \quad (12a)$$

Для смешанного барботажно-струйного режима:

$$\omega = 0,261 \cdot Re^{-0,375} \cdot Ar^{0,225} \cdot We^{0,2} \cdot \Gamma_1^{-0,25} \cdot \Gamma_2^{-0,85} \cdot \Gamma_3 \quad (13)$$

или

$$\varepsilon = 3,8\ Re^{0,375} \cdot Ar^{-0,225} \cdot We^{-0,2} \cdot \Gamma_1^{0,25} \cdot \Gamma_2^{0,85} \cdot \Gamma_3^{-1}. \quad (13a)$$

Для удобства расчета эти уравнения можно представить в следующем виде.

Для барботажного режима:

$$(W_s)_{ср.} = \left(\frac{D^{1,85} \cdot h^{0,24}}{a \cdot d_0^{0,94} \cdot d_1 \cdot n^{0,85}\ W_d^{0,8}} - 1\right) \cdot W_{см}$$

и

$$H = \frac{D^{1,85} \cdot h^{1,24}}{D^{1,85} \cdot h^{0,24} - a \cdot d_0^{0,94} \cdot d_1 \cdot n^{0,85} \cdot W_d^{0,8}};$$

Для смешанного барботажно-струйного режима:

$$(W_s)_{ср.} = \left(\frac{D^{1,85} \cdot h^{0,24}}{b \cdot d_0^{1,2} \cdot d_1 \cdot n^{0,85}\ W_d^{0,375}} - 1\right) \cdot W_{см};$$

и

$$H = \frac{D^{1,85} \cdot h^{1,24}}{D^{1,85} \cdot h^{0,25} - b \cdot d_0^{1,2} \cdot d_1 \cdot n^{0,85} \cdot W_d^{0,375}},$$

где коэффициенты a и b зависят только от физико-химических свойств жидкости и газа.

Совместное решение уравнений (12) и (13) позволяет получить критериально выраженное условие для перехода от барботажного к смешанному режиму:

$$Re^{0,425} \cdot Ar^{-0,225} \cdot \Gamma_1^{-0,01} = 1,82 \qquad (14)$$

или в развернутом виде и с небольшими округлениями:

$$(W_{см})_{крит} = 11,4 \cdot \frac{\gamma_c^{0,6} \cdot n \cdot d_0^{2,6}}{\gamma_в^{0,5} \cdot \mu_c^{0,06} \cdot D^2}. \qquad (15)$$

При этом критерий $\Gamma_1^{-0.01}$ не учитывается, в виду того, что его значения близки к единице.

Обсуждение результатов. Размер статьи не позволяет привести таблицы сравнения расчетных и опытных данных полностью, так как сделано более 1450 опытов.

На рис. 4 и 5 графически показаны расхождения опытных величин от расчетных, представленных в логарифмических шкалах.

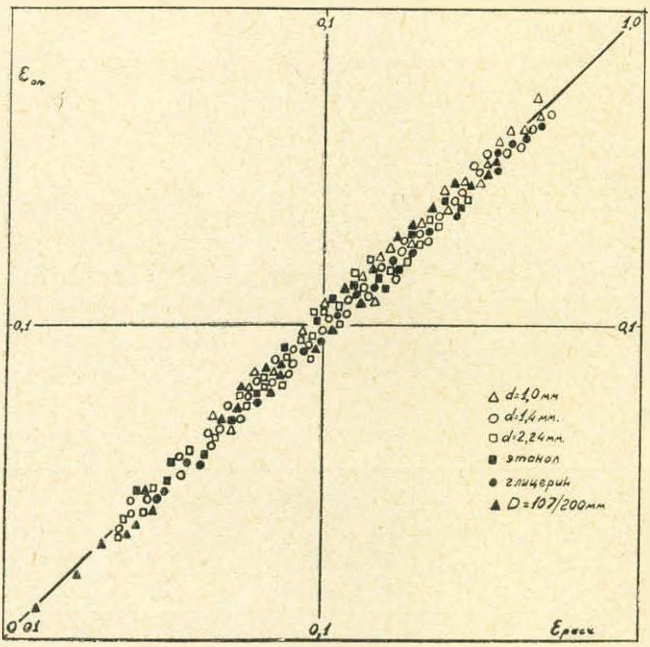


Рис. 4.

На этих рисунках указана только часть точек, так как технически невозможно было показать повторяющиеся и близкие друг к другу точки.

Отклонения расчетных величин от опытных составляют для ε

54,7% всех данных до ± 8%;
41,8% „ „ от ± 8 до ± 15,
3,5% „ „ свыше ± 15%

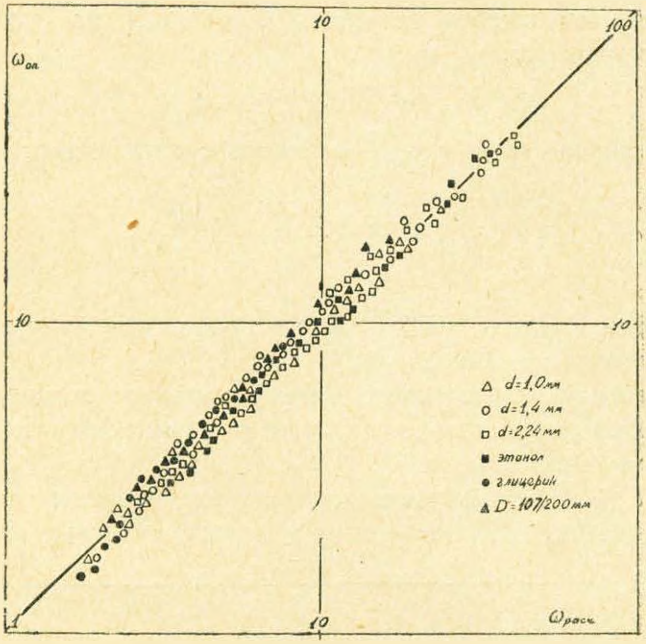


Рис. 5.

для ω — 51,7% всех данных до ± 8%,
40.1% „ „ от ± 8 до ± 15%;
8,2% „ „ свыше ± 15%.

Для наглядности приведена таблица 1, где указываются данные для одной группы опытов с условиями $n = 20$; $d_0 = 1{,}0$ *мм*; $d_1 = D = 76$ *мм*; $h = 0{,}5$*м*; $t = 18$ С; $\Gamma_1 = 0{,}002$; $Ar = 0{,}81 \cdot 10^7$; $We = 7{,}47$; $\Gamma_2 = 0{,}263$; $\Gamma_3 = 1$; переход от барботажного к смешанному режиму при $Re = 20000$:

Таблица 1

№№ опытов	H в *мм*	$W_{см}$ в *см/сек*	$W_s/ср$ расчетное в *см/сек*	$W_s/ср$ опытное в *см/сек*	Re	ω расчетное	ω опытное	% расхождения ω	ε расчетное	ε опытное	% расхождения ε
288	560	2,8	26,6	23,3	7580	10,50	9,30	—11,5	0,095	0,105	+10,5
289	570	3,2	27,0	22,8	8660	9,42	8,13	—13,7	0,106	0,122	+15,0
290	580	4,0	28,0	25,0	10850	8,00	7,25	— 7,5	0,127	0,137	+ 8,0
291	595	4,9	28,4	25,8	13300	6,80	6,27	— 7,7	0,150	0,160	+ 6,6
292	610	6,1	28,8	27,7	16500	5,72	5, 8	— 2,4	0,179	0,180	+ 0,6
293	625	6,9	28,4	27,6	18700	5,11	5,00	— 2,2	0,199	0,200	+ 0,5
294	635	7,9	31,0	29,3	21400	4,89	4,70	— 3,9	0,202	0,212	+ 5,0
295	635	8,4	32,1	31,2	22800	4,82	4,72	— 2,1	0,206	0,212	+ 2,9
296	640	9,1	33,3	32,5	24700	4,66	4,57	— 1,7	0,212	0,218	+ 3,0
297	645	9,8	34,7	33,7	26600	4,55	4,44	— 2,5	0,217	0,224	+ 3,2
298	650	10,3	35,5	34,3	27900	4,44	4,33	— 2,3	0,221	0,230	+ 4,0
299	655	11,2	37,0	36,2	30300	4,30	4,23	— 1,7	0,228	0,235	+ 3,0

Расхождения опытных и расчетных величин лежат в допустимых пределах. Основная часть больших по величине расхождений приходится на:

а) опыты с очень небольшими скоростями газа, когда величина $\frac{h}{H}$ близка к единице и поэтому небольшая субъективная ошибка при замере высоты H сильно искажает в дальнейшем величины $\varepsilon_{оп}$ и $\omega_{оп}$;

б) опыты с весьма большими скоростями газа, когда в верхней части газожидкостного столба образуется слой пены и пленок, затрудняющий замер высоты H;

в) опыты с небольшой высотой слоя жидкости $h = 100$ *мм*, когда невелика также высота H, почему и незначительные ошибки в ее замере существенно влияют на результаты;

г) опыты с глицерином, который, как уже отмечалось [1] имеет тенденцию к образованию мелких и устойчивых взвесей воздуха.

В таблице 2 значение $(W_{см})_{кр}$, рассчитанные по уравнению (15) для разных случаев сопоставляются с экспериментальными значениями $W_{см}$, соответствующими минимумам кривых, приводимых в сообщении [1].

Таблица 2

Условия опыта / $W_{см}$ в *м/сек*	Р. т. № 3 $D=76$ *мм* вода	Р. т. № 7 $D=76$ *мм* вода	Р. т. № 7 $D=107$ *мм* вода	Р. г. № 12 $D=76$ *мм* вода	Р. г. № 12 $D=76$ *мм* этанол 96%
$(W_{см})$ кр.—расчетное	0,0986	0,12	0,065	0,105	0,092
$(W_{см})_{min}$ — опытное	0,085—0,115	0,075—0,13	0,06—0,095	0,1—0,12	0,1—0,125

В графе $(W_{см})_{min}$ показаны пределы для различных значений h. Как показывают данные таблицы, начальная высота слоя жидкости влияет на точку перехода гидродинамических режимов, однако при обработке данных и выводе уравнений (14) она оказалась в степени лишь 0,01 и не была учтена. Это в некоторой мере снижает точность уравнения (15).

Позин и Тумаркина отмечали [7], что при больших скоростях газа уменьшается влияние свойств жидкости на величину газожидкостного столба. Выведенные уравнения (12) и (13) позволяют сказать, что влияния удельного веса и вязкости действительно уменьшаются, так как абсолютные величины показателей степеней критериев Рейнольдса и Архимеда при переходе от барботажного к смешанному режиму убывают, примерно вдвое. Что же касается поверхностного натяжения на границе фаз, то его влияние остается неизменным, так как величина показателя степени критерия Вебера не меняется. Влияние геометрических критериев остается почти неизменным.

Отметим, что обработка данных, полученных Аксельродом и Дильманом [8] показывает большое расхождение опытных и расчетных величин (на 25% и более), что можно объяснить или неприменимостью формул (13) и (13а) к струйному режиму, или же неточностью замера, вызванного малой начальной высотой слоя жидкости h, в опытах упомянутых авторов.

Выводы

1. Показано, что при скоростях подачи газа до 0,35 *м/сек* в слой различных жидкостей возникают два гидродинамических режима, названные ранее режимами свободного всплывания пузырьков в среде жидкости (или барботажным) и смешанным, или чередующимся барботажным и струйным режимом в одном и том же слое жидкости.

2. Выведены критериальные уравнения для расчета средней скорости всплывания газа и высоты газожидкостного столба в области упомянутых двух гидродинамических режимов.

3. Выведено критериальное уравнение, определяющее точки перехода от барботажного к смешанному режиму.

4. Рассмотренные критериальные уравнения удобны для пользования, так как заключают в себе легко измеряемые параметры. Поэтому они позволяют рассчитывать условия для протекающих в различных аппаратах технологических процессов в зависимости от свойств применяемых веществ и конструкции аппаратов.

Завод им. С. М. Кирова Поступило 28.I 1960

Ա. Հ. ԱԶԻԶՅԱՆ, Ռ. Ա. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Ն. Ի. ՍՄԻՐՆՈՎ

ԲԱՐԲՈՏԱԺԱՅԻՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՀԻԴՐՈԴԻՆԱՄԻԿԱՆ

Հաղորդում 2. Հեղուկ միջավայրում գազային բշտիկների մասսայական վերլողման հաշվման հավասարումների արտածումը բարբոտաժային և խառը ռեժիմների համար

Ամփոփում

Հոդվածում տրվում է հիդրոդինամիկ ռեժիմների թվարկումը, որոնք տեղի են ունենում հեղուկում գազի անցման դեպքում։ Առաջին հաղորդման մեջ նկարագրած փորձերի հիման վրա եզրակացվում է, որ գազի վերլողման միջին արագությունը և գազահեղուկային սյան բարձրությունը կախված են գազահեղուկային խառնուրդի բարձրացման արագությունից (կամ անցնող գազի արագությունից), հեղուկի սկզբնական սյան բարձրությունից, բաշխիչ ափսեի անցքերի տրամագծից և նրանց թվից, բաշխիչ ափսեի տրամագծից, ապարատի տրամագծից, հեղուկի և գազի տեսակարար կշիռներից, հեղուկի մածուցիկությունից և հեղուկ-գազ ֆազաների սահմանում մակերևսային լարվա-

ծությունից։ Նմանության և չափման միավորների տեսությունների սովորական միջոցներով գտնված են չափանիշներ, որոնց օգնությամբ այդ վերոհիշյալ փոփոխական մեծությունները արտահայտվում են։ Մշակելով տվյալները գրաֆիկական եղանակով գտնված է այդ չափանիշների միջև մաթեմատիկական կախումը և հետևաբար գտնված են կրիտերիալ հավասարումներ բարբոտաժային և խառն բարբոտաժային-շիթային ռեժիմների համար։

Նշված է, որ անցումը առաջին ռեժիմից դեպի երկրորդը տեղի է ունենում գազի վերլուծման միջին արագության մինիմալ մեծության դեպքում։ Երկու վերոհիշյալ ռեժիմների համար արտահայտված հավասարումների համատեղ լուծումով ստացված է անցման մոմենտին բնորոշող հավասարում։

Փորձնական և հաշված տվյալների համեմատությունը տրվում է գրաֆիկ ձևով և ցույց է տալիս նրանց բավարար համընկումը. բոլոր տվյալների ավելի քան 90 % տալիս է շեղում մինչև ±15 %, ըստ որում բացատրվում են մեծ շեղումների պատճառները։

Համառոտ տրվում է ստացված հավասարումների համեմատությունը այլ հեղինակների տվյալների հետ։

Քանի որ ստացված հավասարումները իրենց մեջ մեծություններ են պարունակում, որոնք հեշտությամբ ենթարկվում են չափման, ապա նրանք թույլ են տալիս տարբեր ապարատներում կատարվող տեխնոլոգիական պրոցեսների համար պայմաններ հաշվել։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азизян А. Г., Меликян Р. А. Смирнов Н. И.* „Известия АН Армянской ССР" (серия техн. н.), №2, 1961.
2. *Меликян Р. А.* ЖПХ, 31, 550, 1958.
3. *Позин М. Е., Мухленов И. П., Тумаркина Е. С., Тарат Э. Я.* ЖПХ, 27, 1, 12, 1954.
4. *Смирнов Н. И., Рубан В. Л.* ЖПХ, 24, 1, 47, 1951.
5. *Блох Е. В.* Основные графические методы обработки опытных данных. Машгиз. 1951.
6. *Романков П. Г.* Гидравлические процессы химической технологии. ГХИ, 1948.
7. *Позин М. Е., Тумаркина Е. С.* ЖПХ, 27, 11, 1170, 1954.
8. *Аксельрод Л. С., Дильман В. В.* ХП, 1, 28, 1954.
9. *Батунер Л. М., Позин М. Е.* Математические методы в химической технике. ГХИ, 1955.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIV, № 3, 1961 Серия технических наук

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Ю. Г. ГРИГОРЬЯН

„МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПУСКОВЫХ РАСХОДОВ, СВЯЗАННЫХ С ВЫБОРОМ СОСТОЯНИЙ АГРЕГАТОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В данной статье приводится методика расчета пусковых расходов при выборе оптимальных состояний по алгорифму, приведенному в статье [I], помещенному в этом номере журнала.

А. Пусть рассматриваемая энергосистема состоит из m тепловых станций на каждой из которых возможны соответственно $s_1, s_2 \ldots s_m$ состояний. Обозначим общее число турбогенераторов и котлов на каждой из m тепловых станций соответственно числами: x_c, y_c $(c = \overline{1, m})$.

Будем для удобства характеризовать состояния составными числами

$$M_c = x_c + jy_c,$$

$$M_{k_c}(t) = x_{k_c}(t) + jy_{k_c}(t), \qquad (1)$$

где k_c — индекс состояний на каждой станции.

$$k_1 = \overline{1, s_1};\ k_2 = \overline{1, s_2}; \cdots\cdots;\ k_m = \overline{1, s_m}.$$

Первые слагаемые чисел (1) будут характеризовать число действующих турбогенераторов, а коэффициент при j — число действующих котлов соответственно для каждой тепловой станции системы в какой-то час t. Зависимость $M_{k_c}(t)$ от времени означает, что состояния могут меняться в зависимости от t, хотя бы потому, что должно удовлетворяться условие (4) [I]. Общее число различных комбинаций состояний на каждый расчетный час t будет $N_0 = \prod\limits_{i=1}^{m} s_i$.

Составим функции:

$$\Delta M_{k_c}(t) = M_c - M_{k_c}(t) = [x_c - x_{k_c}(t)] + j\,[y_c - y_{k_c}(t)] =$$

$$= \Delta x_{k_c}(t) + j\Delta y_{k_c} \qquad (2)$$

Функции $\Delta M_{k_c}(t)$ характеризуют останавливаемые турбогенераторы и котлы при $t = \overline{1,24}$ соответственно для каждой из тепловых станций системы.

Числа $\Delta x_{k_c}(t) \geqslant 0$ и $\Delta y_{k_c}(t) \geqslant 0$, целые и неотрицательные, причем равенство 0 означает, что в данный t-ый час в покрытии нагрузки участвуют все котлы и турбогенераторы.

Для наглядности вышеизложенного составим следующую таблицу:

Таблица 1

t	1	2	3	4	5		21	22	23	24
$\Delta x_{k_c}(t)$	$\Delta x_{k_c}(1)$	$\Delta x_{k_c}(2)$	$\Delta x_{k_c}(3)$	$\Delta x_{k_c}(4)$	$\Delta x_{k_c}(5)$	..	..	..	$\Delta x_{k_c}(23)$	$\Delta x_{k_c}(24)$
$\Delta y_{k_c}(t)$	$\Delta y_{k_c}(1)$	$\Delta y_{k_c}(2)$	$\Delta y_{k_c}(3)$	$\Delta y_{k_c}(3$	$\Delta y_{k_c}(5)$	..	..	..	$\Delta y_{k_c}(23)$	$\Delta y_{k_c}(24)$

Эта таблица характеризует функцию $\Delta M_{k_c}(t)$ для каждого c и t

$$(c = \overline{1,\ m});\ (t = \overline{1{,}24}).$$

Б. Принимается $c = 1$ и фиксируются те моменты времени t, при котором $\Delta x_{k_1}(t) = 0$, $t = \overline{1{,}24}$. Если таких t не существует, то это означает, что какой-то один турбогенератор в течение всех часов $t = \overline{1{,}24}$ простоял и на его пуск в течение этих суток никакого дополнительного топлива не надо; очевидно, если все $\Delta x_{k_1} = 0$ для всех $t = \overline{1{,}24}$, то это означает, что в течение суток в покрытии нагрузки участвовали все турбогенераторы и для них пусковые расходы не требуются. Аналогичные рассуждения приводятся для функции $\Delta y_{k_1}(t)$ и вообще для всех функций $\Delta x_{k_c}(t)$ и $\Delta y_{k_c}(t)$.

Тогда получаются следующие последовательности для турбогенераторов всех станций:

$$t_1^{(c)},\ t_2^{(c)}, \ldots,\ t_{\alpha c-1}^{(c)} \tag{3}$$

и такие же последовательности

$$\theta_1^{(c)},\ \theta_2^{(c)}, \ldots,\ \theta_{\beta c-1}^{(c)} \tag{4}$$

для котлов этих же станций, где $c = \overline{1,\ m}$.

Справа добавляются к этим точкам еще две точки $t_{\alpha_c}^{(c)} = t_1^{(c)} + 24$ и $\theta_{\beta_c}^{(c)} = \theta_1^{(c)} + 24$ соответственно к последовательностям (3) и (4), которые окончательно принимают следующий вид

$$t_1^{(c)},\ t_2^{(c)}, \ldots\ldots,\ t_{\alpha_c-1}^{(c)},\ t_{\alpha_c}^{(c)} \tag{3'}$$

$$\theta_1^{(c)},\ \theta_2^{(c)}, \ldots\ldots,\ \theta_{\beta_c-1}^{(c)},\ \theta_{\beta_c}^{(c)}. \tag{4'}$$

Составляются из последовательностей (3′) и (4′) следующие разности:

$$t_2^{(c)} - (t_1^{(c)} + 1) = \Delta t_1^{(c)}$$
$$t_3^{(c)} - (t_2^{(c)} + 1) = \Delta t_2^{(c)}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$t_{\alpha_c}^{(c)} - (t_{\alpha_c-1}^{(c)} + 1) = \Delta t_{\alpha_c-1}^{(c)}$$
$$\theta_2^{(c)} - (\theta_1^{(c)} + 1) = \Delta\theta_1^{(c)}$$
$$\theta_3^{(c)} - (\theta_2^{(c)} + 1) = \Delta\theta_2^{(c)}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\theta_{\beta_c}^{(c)} - (\theta_{\beta_c-1}^{(c)} + 1) = \Delta\theta_{\beta_c-1}^{(c)}.$$

Полученные разности представляются в виде следующих последовательностей

$$\Delta t_1^{(c)},\ \Delta t_2^{(c)}, \ldots\ldots,\ \Delta t_{\alpha_c-1}^{(c)} \tag{5}$$

$$\Delta t_1^{(c)},\ \Delta\theta_2^{(c)}, \ldots\ldots,\ \Delta\theta_{\beta_c-1}^{(c)} \tag{6}$$

Из таблицы (2) имея в виду, что

$$\Delta t_1^{(c)} = T_1^{(c)} + \tau_1^{(c)}$$
$$\Delta t_1^{(c)} = T_2^{(c)} + \tau_2^{(c)}$$
$$\cdots\cdots\cdots$$
$$\Delta t_{\alpha_c-1}^{(c)} = T_{\alpha_c-1}^{(c)} + \tau_{\varepsilon_c-1}^{(c)}$$

и

$$\Delta\theta_1^{(c)} = \widetilde{T}_1^{(c)} + \widetilde{\tau}_1^{(c)}$$
$$\Delta\theta_2^{(c)} = \widetilde{T}_2^{(c)} + \widetilde{\tau}_2^{(c)}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\Delta\theta_{\beta_c-1}^{(c)} = \widetilde{T}_{\beta_c-1}^{(c)} + \widetilde{\tau}_{\beta_c-1}^{(c)}$$

находятся;

$T_1^{(c)},\ T_2^{(c)}, \ldots, T_{\alpha_c-1}^{(c)}$ — промежутки простоя одного турбогенератора для всех m станций;

$\tau_1^{(c)},\ \tau_2^{(1)}, \ldots, \tau_{\alpha_c-1}^{(c)}$ — промежутки пуска одного турбогенератора для всех m станций;

$\widetilde{T}_1^{(c)},\ \widetilde{T}_2^{(c)}, \ldots, \widetilde{T}_{\beta_c-1}^{(c)}$ — промежутки простоя одного котла для всех m станций;

$\widetilde{\tau}_1^{(c)},\ \widetilde{\tau}_2^{(c)}, \ldots, \widetilde{\tau}_{\beta_c-1}^{(c)}$ — промежутки пуска одного котла для всех m станций

$$(c = \overline{1,\ m}).$$

Тогда формулы для пусковых расходов представляются в следующем виде

$$B_{c\tau_i} = D_c \frac{T^{(c)}_{\eta-1}}{h_c} \text{ т. у. т.} \tag{7}$$

для одного турбогенератора каждой станции, где

$$T^{(c)}_{\eta-1} = \begin{cases} T^{(c)}_{\eta-1} & \text{при} \quad T^{(c)}_{\eta-1} \leqslant h_c \\ h_c & \text{при} \quad T^{(c)}_{\eta-1} > h_c \end{cases}$$

$$B_{c\gamma} = G_c \frac{\widetilde{T}^{(c)}_{\gamma-1}}{L_c} \text{т.у.т.} \tag{8}$$

для одного котла каждой станции, где

$$\widetilde{T}^{(c)}_{\gamma-1} = \begin{cases} \widetilde{T}^{(c)}_{\gamma-1} & \text{при} \quad \widetilde{T}^{(c)}_{\gamma-1} \leqslant L_c \\ L_c & \text{при} \quad \widetilde{T}^{(c)}_{\gamma-1} > L_c \end{cases}$$

причем $\eta = \overline{1,\ \alpha_c}$; $\gamma = \overline{1,\ \beta_c}$; $c = \overline{1,\ m}$.

D_c, h_c, G_c, L_c — известные параметры энергосистемы.

Следовательно, пусковые расходы представятся

$$T_{c\pi} = \sum_{\eta=1}^{\alpha_c} B_{c\tau_i} \tag{9}$$

для турбогенераторов c-ой станции

$$\widetilde{T}_{c\pi} = \sum_{\gamma=1}^{\beta_c} B_{c\gamma} \tag{10}$$

для котлов c-ой станции.

Если окажется, что все $\Delta x_{k_c}(t)$, $\Delta y_{k_c}(t)$ при $t = \overline{1,24}$ меньше или равны 1, то по формуле (1) [1] вычисляется суммарное топливо T для определенного набора состояний, полученного из алгоритма, изложенного там же и фиксируется набор состояний в каждый час t.

Если окажется, что хоть одно из чисел $\Delta x_{k_c}(t)$ и $\Delta y_{k_c}(t)$ больше единицы, означающее, что останавливаемые турбогенераторы и котлы на станциях больше 1, поступают следующим образом. Из $\Delta x_{k_c}(t)$ и $\Delta y_{k_c}(t)$ вычитывается 1 и полученные разности помещаются на их места таблицы (1), причем, если окажется, что

$$\Delta x_{k_c}(t) - 1 < 0$$

$$\Delta y_{k_c}(t) - 1 < 0,$$

то вместо этих разностей записывается 0, т. е. более коротко, эти условия выразятся функционально следующим образом:

$$\Delta x_{k_c}(t) - 1 = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad \Delta x_{k_c}(t) - 1 < 0 \\ \Delta x_{k_c} - 1 & \text{при} \quad \Delta x_k(t) - 1 \geqslant 0 \end{cases}$$

$$\Delta y_{k_c}(t) - 1 = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad \Delta y_{k_c}(t) - 1 < 0 \\ \Delta y_{k_c} - 1 & \text{при} \quad \Delta y_{k_c}(t) - 1 \geqslant 0. \end{cases}$$

Затем весь ход рассуждений такой-же, начиная с пункта Б.

Таблица 2

Для турбогенераторов c-ой станции			Для котлов c-ой станции		
простой + пуск $\Delta t^{(c)}_{\eta-1}$	число часов простоя $T^{(c)}_{\eta-1}$	число часов пуска $\tau^{(c)}_{\eta-1}$	простой + пуск $0\Delta^{(c)}_{\gamma-1}$	число часов простоя $\tilde{T}^{(c)}_{\gamma-1}$	число часов пуска $\tilde{\tau}^{(c)}_{\gamma-1}$
1	$T^{(c)}_{\eta-1}$ (1)	$\tau^{(c)}_{\eta-1}$ (1)	1	$\tilde{T}^{(c)}_{\gamma-1}$ (1)	$\tilde{\tau}^{(c)}_{\gamma-1}$ (1)
2	$T^{(c)}_{\eta-1}$ (2)	$\tau^{(c)}_{\eta-1}$ (2)	2	$\tilde{T}^{(c)}_{\gamma-1}$ (2)	$\tilde{\tau}^{(c)}_{\gamma-1}$ (2)
3	$T^{(c)}_{\eta-1}$ (3)	$\tau^{(c)}_{\eta-1}$ (3)	3	$\tilde{T}^{(c)}_{\gamma-1}$ (3)	$\tilde{\tau}^{(c)}_{\gamma-2}$ (3)
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
24	$T^{(c)}_{\eta-1}$ (24)	$\tau^{(c)}_{\eta-1}$ (24)	24	$\tilde{T}^{(c)}_{\gamma-1}$ (24)	$\tilde{\tau}^{(c)}_{\gamma-1}$ (24)

Таблицей (3), являющейся частным случаем таблицы (2) задаются параметры, необходимые для расчета пусковых расходов одной энергосистемы с состояниями, приведенными в указанной выше статье.

Следует заметить, что если $\Delta t^{(1)}_{\eta-1} > 15$, то число часов пуска для т. г. первой станции остается равным трем, когда $\Delta\theta^{(1)}_{\gamma-1} > 17$, то число часов пуска для котлов первой станции остается равным пяти.

Параметры D_c, h_c, G_c, L_c имеют следующий вид:

$$D_1 = 1 \text{ т. у. т.}; \ D_2 = 3 \text{ т. у. т}; \ h_1 = 12 \text{ часов}; \ h_2 = 18 \text{ час}.$$

$$G_1 = 5{,}2 \text{ т. у. т}; \ L_1 = 12 \text{ час.}$$

D_3, h_3, G_2, G_3, L_2, L_3 не приводятся, так как исходя из данных для этой энергосистемы эти параметры не требуются в процессе решения задачи. Заметим, что вышеизложенная методика расчета пусковых расходов несколько сложна из-за общности поставленной задачи. Для конкретных примеров она принимает довольно простой вид.

Таблица 3

Для т. г. первой станции			Число котлов первой станции			Для т. г. второй станции		
Простой + + пуск	Число часов простоя	Число часов пуска	Простой + + пуск	Число часов простоя	Число часов пуска	Простой + + пуск	Число часов простоя	Число часов пуска
$\Delta t^{(1)}_{\eta-1}$	$T^{(1)}_{\eta-1}$	$\tau^{(1)}_{\eta-1}$	$\Delta\theta^{(1)}_{\gamma-1}$	$\widetilde{T}^{(1)}_{\gamma-1}$	$\widetilde{\tau}^{(1)}_{\gamma-1}$	$\Delta t^{(2)}_{\eta-1}$	$T^{(2)}_{\eta-1}$	$\tau^{(2)}_{\eta-1}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5
2	1,5	0,5	2	1	2	2	1	1
3	2	1	3	2	1	3	2	1
4	3	1	4	2,5	1,5	4	3	1
5	3,5	7,5	5	3	2	5	3,5	1,5
6	4,5	1,5	6	4	2	6	4	2
7	5,5	1,5	7	5	2	7	5	2
8	6,5	1,5	8	5,5	2,5	8	6	2
9	7,5	1,5	9	6	3	9	6,5	2,5
10	8	2	10	7	3	10	7	3
11	9	2	11	8	3	11	8	3
12	10	2	12	8,5	3,5	12	9	3
13	11	2	13	9	4	13	9,5	3,5
14	11,5	2,5	14	10	4	14	10	4
15	12	3	15	11	4	15	10	5
16	—	—	16	11,5	4,5	16	11	5
17	—	—	17	12	5	17	12	5
18	—	—	—	—	—	18	12,5	5,5
19	—	—	—	—	—	19	12,5	6,5
20	—	—	—	—	—	20	13	7
21	—	—	—	—	—	21	14	7
22	—	—	—	—	—	22	15	7
23	—	—	—	—	—	23	16	7
24	—	—	—	—	—	24	17	7

Институт электротехники
АН Армянской ССР

Поступило 25. X 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адонц Г. Т., Григорьян Ю. Г., Адонц М. М.* Алгоритм, программа и пример расчета на ВМДД режима экономии топлива энергосистемы, связанного с выбором состояния агрегатов (данный номер журнала).

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

СОДЕРЖАНИЕ