

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ.
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԽՐԱԳՐԱԿԱՆ ԳՈՐԾԻՆ

Արմեն Հ. Տ., Այնթապցի Վ. Վ., Եղիազարյան Ի. Վ., Կասյան,
Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Նազարով Ա. Գ., Սիմոնով Մ. Զ.
Փրնաշյան Վ. Վ. (պատ. խմբագիր տեղակալ)։

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Авонц Г. Т., Алексеевский В. В., Егизаров И. В., Касьян
М. В. (ответ. редактор), Назаров А. Г., Симонян В. В.
(зам. отв. редактора), Симонов М. З.

Г. Т. АДОНИ

К ТЕОРИИ И МЕТОДАМ РАСЧЕТА МНОГОПОЛЮСНИКА

Сообщение 2

Расчет комплексных напряжений пар зажимов многополюсника по заданным активным и реактивным мощностям источников энергии, подключенных к нему

Постановка задачи. Задаются параметры многополюсника (y_{mk} , φ_{mk}) активные (P_m) и реактивные (Q_m) мощности источников, подключенных к его зажимам. Требуется определить модули (U) и аргументы (ψ) комплексных напряжений на зажимах многополюсника. Уравнения, определяющие зависимость между перечисленными величинами, имеют вид

$$\begin{aligned} P_m &= U_m \sum_{k=1}^n U_k y_{mk} \cos (\varphi_{km} + \varphi_{km}); \\ Q_m &= U_m \sum_{k=1}^n U_k y_{mk} \sin (\varphi_{km} + \varphi_{km}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $k, m = 1, 2, \dots, n$.

Рассматриваемая задача расчета комплексных напряжений по заданным мощностям является одной из важнейших в общей проблеме расчета и управления режимами энергосистем, осуществляемых с помощью цифровых машин (ЦМ). Основные трудности в решении этой задачи возникают в связи с необходимостью обеспечения определенной быстроты сходимости результатов расчета, выполняемого методом последовательных приближений. Исследования этой задачи показали, что быстрота сходимости зависит не только от метода расчета, но и от структуры исходных уравнений. Предлагаемые в статье структура уравнений и методы их решения обеспечивают быстроту сходимости. Алгоритм решения рассматриваемой задачи может быть использован для расчета модулей и аргументов комплексных напряжений на генераторных и нагрузочных узлах энергосистемы по заданным активным и реактивным мощностям этих же узлов; для определения исходного режима энергосистемы, необходимого, в свою очередь, для расчетов статической и динамической устойчивости энергосистем и т. д. Пред-

лагаемый метод расчета является итеративным и базируется на последовательном использовании решений одной системы уравнений в качестве исходных данных для решения второй системы уравнений и наоборот.

Исходные системы уравнений. В качестве основных принимают следующие системы уравнений:

а) Система (2) из $(2n-2)$ уравнений относительно $(2n-2)$ неизвестных вида $\cos \psi_k$ и $\sin \psi_k$, где $k = 2, 3, \dots, n$.

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{U_1} - U_1 g_{11} &= \sum_{k=2}^n (U_k g_{1k} \cos \psi_k + U_k b_{1k} \sin \psi_k); \\ U_1 b_{11} - \frac{Q_1}{U_1} &= \sum_{k=2}^n (U_k b_{1k} \cos \psi_k + U_k g_{1k} \sin \psi_k); \\ -U_1 g_{a1} &= \sum_{k=2}^n (U_k g_{ak} \cos \psi_k + U_k b_{ak} \sin \psi_k) - \frac{P_a}{U_a} \cos \psi_a - \frac{Q_a}{U_a} \sin \psi_a; \\ U_1 b_{a1} &= \sum_{k=2}^n (U_k b_{ak} \cos \psi_k + U_k g_{ak} \sin \psi_k) + \frac{Q_a}{U_a} \cos \psi_a - \frac{P_a}{U_a} \sin \psi_a; \end{aligned} \quad (2)$$

$$a = 2, 3, \dots, n-1.$$

б) Система (3) из $(2n-2)$ уравнений относительно $(2n-2)$ неизвестных вида $\cos \psi_k$ и $\sin \psi_k$, где $k = 2, 3, \dots, n$.

$$\begin{aligned} -U_d g_{d1} &= \sum_{k=2}^n (U_k g_{dk} \cos \psi_k + U_k b_{dk} \sin \psi_k) - \frac{P_d}{U_d} \cos \psi_d - \frac{Q_d}{U_d} \sin \psi_d; \\ U_d b_{d1} &= \sum_{k=2}^n (U_k b_{dk} \cos \psi_k + U_k g_{dk} \sin \psi_k) + \frac{Q_d}{U_d} \cos \psi_d - \frac{P_d}{U_d} \sin \psi_d. \end{aligned} \quad (3)$$

$$d = 2, 3, \dots, n.$$

в) Система (4) из $2n$ уравнений относительно $0,5n(n+1)$ неизвестных вида $U_k U_m$.

$$\begin{aligned} \cos \psi_m &= \sum_{k=1}^n U_k U_m (\alpha_{mk} \cos \psi_k + \beta_{mk} \sin \psi_k); \\ \sin \psi_m &= \sum_{k=1}^n U_k U_m (\alpha_{mk} \sin \psi_k - \beta_{mk} \cos \psi_k); \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_{mk} &= \frac{1}{P_m^2 + Q_m^2} (P_m g_{mk} + Q_m b_{mk}); \\ \beta_{mk} &= \frac{1}{P_m^2 + Q_m^2} (P_m b_{mk} - Q_m g_{mk}); \\ m, k &= 1, 2, \dots, n; \psi_1 = 0. \end{aligned}$$

Вопрос о соответствии числа располагаемых уравнений системы (4) числу неизвестных вида $U_k U_m$ требует определенного анализа.

А именно, для обеспечения искомого соответствия числа уравнений системы (4) числу неизвестных вида $U_k U_m$ предлагается принять в качестве заданных величин, кроме: ψ , α , β , некоторое число k_u модулей напряжений. Величина k_u , зависящей от числа n пар полюсов многополюсника, определяется порядок разбиения системы уравнений (4) на две отдельные группы. Рассмотрим сначала частные случаи n и k_u .

а) Случай $k_u = 0$, т. е. $n = 1, 2, 3$. Уравнения (4) не разбиваются на группы, так как в этом случае их число достаточно для определения искомых величин $U_k U_m$.

б) Случай $k_u = 1$, т. е. $n = 4, 5, 6$. Система (4) из $2n$ уравнений разбивается на следующие две группы.

В первую группу включаются два уравнения, записанные относительно искомых U_2 и U_3 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_1^{(0)}} - U_1^{(0)} \alpha_{11} - \sum_{k=2}^n U_k (\alpha_{1k} \cos \psi_k + \beta_{1k} \sin \psi_k) = \\ = \sum_{a=2}^n U_a (\alpha_{1a} \cos \psi_a + \beta_{1a} \sin \psi_a); \\ U_1^{(0)} \beta_{11} - \sum_{k=2}^n U_k (-\beta_{1k} \cos \psi_k + \alpha_{1k} \sin \psi_k) = \\ = \sum_{a=2}^n U_a (-\beta_{1a} \cos \psi_a + \alpha_{1a} \sin \psi_a). \end{aligned} \quad (4_1)$$

где $U_1^{(0)}$ — заданное напряжение на первой паре зажимов многополюсника.

Во вторую группу включаются остальные $2n - 2$ уравнения, записанные относительно искомых $U_k U_m$ и U_m :

$$\begin{aligned} \cos \psi_n = U_1^{(0)} U_m \alpha_{m1} + \sum_{a=2}^n U_a U_m (\alpha_{ma} \cos \psi_a + \beta_{ma} \sin \psi_a) + \\ + \sum_{k=2}^n U_k U_m (\alpha_{mk} \cos \psi_k + \beta_{mk} \sin \psi_k); \\ \sin \psi_m = -U_1^{(0)} U_m \beta_{m1} + \sum_{a=2}^n U_a U_m (-\beta_{ma} \cos \psi_a + \alpha_{ma} \sin \psi_a) + \\ + \sum_{k=2}^n U_k U_m (-\beta_{mk} \cos \psi_k + \alpha_{mk} \sin \psi_k), \end{aligned} \quad (4_2)$$

где $m = 2, 3, \dots, n$.

в) Случай $k_u = 2$, т. е. $n = 7, 8, 9, 10$. Система (4) из $2n$ уравнений также разбивается на две группы.

В первую группу включаются четыре уравнения, записанные относительно искомых U_2, U_4, U_6, U_8 :

$$\begin{aligned}
\frac{1}{U_m^{(0)}} \cos \psi_m &= \sum_{d=1}^2 U_d^{(0)} (\alpha_{md} \cos \psi_d + \beta_{md} \sin \psi_d) - \\
&= \sum_{k=3}^n U_k (\alpha_{mk} \cos \psi_k + \beta_{mk} \sin \psi_k) = \sum_{a=3}^6 U_a (\alpha_{ma} \cos \psi_a + \beta_{ma} \sin \psi_a); \\
\frac{1}{U_m^{(0)}} \sin \psi_m &= \sum_{d=1}^2 U_d^{(0)} (-\beta_{md} \cos \psi_d + \alpha_{md} \sin \psi_d) - \sum_{k=3}^n U_k (-\beta_{mk} \cos \psi_k + \\
&+ \alpha_{mk} \sin \psi_k) = \sum_{a=3}^6 U_a (-\beta_{ma} \cos \psi_a + \alpha_{ma} \sin \psi_a), \quad (4_2)
\end{aligned}$$

где $m = 1, 2$; $\psi_1 = 0$, $U_1^{(0)}$, $U_2^{(0)}$ — заданные напряжения соответственно на первой и второй парах зажимов многополюсника.

Во вторую группу включаются остальные $2n - 4$ уравнения, записанные относительно искомых U_k , U_m и U_n :

$$\begin{aligned}
\cos \psi_m &= \sum_{d=1}^2 U_d^{(0)} U_m (\alpha_{md} \cos \psi_d + \beta_{md} \sin \psi_d) - \\
&= \sum_{a=3}^6 U_a U_m (\alpha_{ma} \cos \psi_a + \beta_{ma} \sin \psi_a) - \\
&+ \sum_{k=3}^n U_k U_m (\alpha_{mk} \cos \psi_k + \beta_{mk} \sin \psi_k), \\
\sin \psi_m &= \sum_{d=1}^2 U_d^{(0)} U_m (-\beta_{md} \cos \psi_d + \alpha_{md} \sin \psi_d) - \sum_{a=3}^6 U_a U_m (-\beta_{ma} \cos \psi_a + \\
&+ \alpha_{ma} \sin \psi_a) - \sum_{k=3}^n U_k U_m (-\beta_{mk} \cos \psi_k + \alpha_{mk} \sin \psi_k), \quad (4_1)
\end{aligned}$$

где $m = 3, 4, \dots, n$.

Аналогично изложенному могут быть записаны уравнения для случаев $k_u = 3, 4$ и т. д., которые путем разбиения на группы уравнений (4₁) и (4₂), или (4_с) и (4_и) могут быть решены в два этапа. Решение первой из этих групп уравнений дает возможность определить U_k и U_j (при $k_u = 1$) или $U_j - U_a$ (при $k_u = 2$) как функции от остальных искомых величин U_k . Таким образом, при любом значении k_u система (4) из $2n$ -уравнений разбивается на две группы, состоящие, соответственно, из $2k_u$ и $2n - 2k_u$ уравнений. Совместное решение $2k_u$ уравнений позволяет выразить $2k_u$ величин вида U_a и функции U_k при известных; α , β , ψ и $U_d^{(0)}$ ($d = 1$ при $k_u = 1$; $d = 2, 3$ при $k_u = 2$ и т. д.). В результате подстановки полученных U_a во вторую группу уравнений последняя оказывается содержащей $0,5(n - 3k_u) \cdot (n - 3k_u + 1)$ неизвестных вида $U_k U_m$ и $(n - 3k_u)$ неизвестных вида U_m . Другими словами, зависимость числа располагаемых уравнений $2n - 2k_u$ от числа искомых неизвестных вида $U_k U_m$ и U_m определяется условием

$$2n - 2k_n \geq 0,5 (n - 3k_n) (n - 3k_n + 1) + (n - 3k_n). \quad (5)$$

которое после преобразований принимает вид

$$k_n = \frac{6n + 5 - \sqrt{96n + 25}}{18}. \quad (5_1)$$

Принимая, что (5₁) формально верна и для случая $n=1, 2, 3$, получим следующие величины k_n в функции ряда значений n .

n	1:3	4:6	7:10	11:14	15:18	19:21	22:25
k_n	0	1	2	3	4	5	6

Алгоритм решения поставленной задачи

Рассмотрим решение для случая $k_n=2$. Имеется в виду, что задачи для случаев $k_n=3, 4$ и т. д. решаются по аналогичному алгоритму.

Принцип расчета. Берутся в качестве нулевого приближения некоторые значения $U_k^{(0)}$ модулей напряжений пар зажимов многополюсника. В качестве таких напряжений могут быть взяты или а) некоторые произвольные величины U , или б) номинальное напряжение данной схемы замещения, или в) напряжения, найденные по уравнениям (4) при условии $\psi_k=0$. Заметим, напряжения на k_n парах зажимов (в данном случае, $U_1^{(0)}$ и $U_2^{(0)}$), оказываются параметрами уравнений, так как они, по условиям задачи, задаются в качестве известных величин. Путем совместного решения уравнений (2) и (3) находятся значения углов $\psi_k^{(1)}$, которые принимаются в качестве первого приближения к искомым величинам ψ_k . Найденные значения углов подставляются в уравнения (4), в результате решения которых находятся модули напряжений $U_k^{(1)}$ пар зажимов многополюсника. Эти напряжения принимаются в качестве первого приближения к искомым величинам U_k . Путем подстановки последних в уравнения (2) и (3) и их совместного решения находятся новые значения узлов $\psi_k^{(2)}$, принимаемые в качестве второго приближения к искомым величинам и т. д. Описанный процесс повторяется τ раз, пока приращения между модулями напряжений каждой пары зажимов многополюсника в σ -ом и $(\sigma-1)$ -м приближениях не окажутся меньше величины допустимой погрешности решения задачи.

Схема расчета. Введем для обозначения шага последовательных приближений к искомым величинам U и ψ верхний индекс (i) , т. е. $i=1, 2, \dots, \tau$, где τ —последний шаг итерации. Рассмотрим схему расчета для i -го шага приближения к искомым ψ , а затем к искомым U .

i-ое приближение к искомым

и) Уравнения (2) при известных величинах: P , Q , q , g , и также $U_k^{(i-1)}$ представляются следующей системой из $2n-2$ уравнений, записанных относительно $\cos \varphi_k^{(i)}$ и $\sin \varphi_k^{(i)}$:

$$\frac{P_1}{U_1^{(i-1)}} - U_1^{(i-1)} g_{11} = \sum_{k=2}^n (U_k^{(i-1)} g_{1k} \cos \varphi_k^{(i)} + U_k^{(i-1)} b_{1k} \sin \varphi_k^{(i)});$$

$$U_1^{(i-1)} b_{11} - \frac{Q_1}{U_1^{(i-1)}} = \sum_{k=2}^n (-U_k^{(i-1)} b_{1k} \cos \varphi_k^{(i)} + U_k^{(i-1)} g_{1k} \sin \varphi_k^{(i)});$$

$$U_1^{(i-1)} g_{a1} = \sum_{k=2}^n (U_k^{(i-1)} g_{ak} \cos \varphi_k^{(i)} + U_k^{(i-1)} b_{ak} \sin \varphi_k^{(i)}) - \frac{P_a}{U_a^{(i-1)}} \cos \varphi_a^{(i)} - \frac{Q_a}{U_a^{(i-1)}} \sin \varphi_a^{(i)};$$

$$U_1^{(i-1)} b_{a1} = \sum_{k=2}^n (-U_k^{(i-1)} b_{ak} \cos \varphi_k^{(i)} + U_k^{(i-1)} g_{ak} \sin \varphi_k^{(i)}) + \frac{Q_a}{U_a^{(i-1)}} \cos \varphi_a^{(i)} - \frac{P_a}{U_a^{(i-1)}} \sin \varphi_a^{(i)},$$

где $a=2, 3, \dots, n-1$; $U_1^{(i-1)}=U_1^{(i)}=U_1^{(0)}$; $U_2^{(i-1)}=U_2^{(i)}=U_2^{(0)}$, т. е. величины $U_1^{(0)}$ и $U_2^{(0)}$ являются постоянными для всех шагов последовательных приближений. В результате совместного решения (6) находятся $\cos \varphi_k^{(i)}$ и $\sin \varphi_k^{(i)}$, где $k=2, 3, \dots, n$, $\varphi_1=0$ i — индекс шага, c, s — дополнительные индексы для различия величин φ , получаемых по значениям $\cos \varphi$, с одной стороны, и $\sin \varphi$, с другой. Легко показать, что во всех шагах приближения, кроме последнего n -го шага, $\varphi_k^{(i)} \neq \varphi_k^{(i-1)}$.

б) Путем совместного решения следующих $2n-2$ уравнений вида (3)

$$U_d^{(i-1)} g_{d1} = \sum_{k=2}^n (U_k^{(i-1)} g_{dk} \cos \varphi_k^{(i)} + U_k^{(i-1)} b_{dk} \sin \varphi_k^{(i)}) - \frac{P_d}{U_d^{(i-1)}} \cos \varphi_d^{(i)} - \frac{Q_d}{U_d^{(i-1)}} \sin \varphi_d^{(i)};$$

$$U_d^{(i-1)} b_{d1} = \sum_{k=2}^n (-U_k^{(i-1)} b_{dk} \cos \varphi_k^{(i)} + U_k^{(i-1)} g_{dk} \sin \varphi_k^{(i)}) + \frac{Q_d}{U_d^{(i-1)}} \cos \varphi_d^{(i)} - \frac{P_d}{U_d^{(i-1)}} \sin \varphi_d^{(i)}, \quad (7)$$

где $d=2, 3, \dots, n$.

Дополнительные индексы cc и ss вводятся для различия значений φ_k , определяемых по $\cos \varphi_k$ и $\sin \varphi_k$.

я) Полученные в результате решения систем уравнений (6) и (7) значения $\sin \psi$ и $\cos \psi$ усредняются по формулам:

$$\cos \psi_{k,co}^{(i)} = 0,5 (\cos \psi_{k,co}^{(i)} + \cos \psi_{k,co}^{(i)});$$

$$\sin \psi_{k,sl}^{(i)} = 0,5 (\sin \psi_{k,sl}^{(i)} + \sin \psi_{k,sl}^{(i)}).$$

где $k=2, 3, \dots, n$, $\psi_1=0$. Величины $\cos \psi$ и $\sin \psi$, оказавшиеся в результате решения (6) и (7) больше единицы отбрасываются, т. е. не используются в формулах (8), как не имеющие смысла.

г) По полученным парам значений $\cos \psi_{k,co}^{(i)}$ и $\sin \psi_{k,sl}^{(i)}$ (с учетом их знаков) находятся $\psi_{k,co}^{(i)}$ и $\psi_{k,sl}^{(i)}$. Эти величины принимаются в качестве i -го приближения и искомым ψ_k . Так как во всех шагах последовательного приближения, кроме последнего, будет иметь место $\psi_{k,co}^{(i)} \neq \psi_{k,sl}^{(i)}$, то возникает разветвление расчета искомым U_k . Одна ветвь расчета строится на полученных значениях $\psi_{k,co}^{(i)}$, а другая — на значениях $\psi_{k,sl}^{(i)}$.

Рассмотрим схему последующих расчетов, базирующихся на величинах $\psi_{k,co}^{(i)}$ схемы расчета с использованием $\psi_{k,sl}^{(i)}$ аналогична ниже рассматриваемой.

i-ое приложение к искомым U . В случае $k_n=0$, т. е. $n=1, 2, 3$, расчетными для определения $U_k^{(i)}$ являются следующие уравнения, записанные относительно неизвестных $U_k^{(i)}$, $U_m^{(i)}$:

$$\cos \psi_{m,co}^{(i)} = \sum_{k=1}^n U_k^{(i)} U_m^{(i)} (x_{mk} \cos \psi_{k,co}^{(i)} + y_{mk} \sin \psi_{k,co}^{(i)});$$

$$\sin \psi_{m,co}^{(i)} = \sum_{k=1}^n U_k^{(i)} U_m^{(i)} (-y_{mk} \cos \psi_{k,co}^{(i)} + x_{mk} \sin \psi_{k,co}^{(i)}), \quad (9)$$

где $m=2, 3, \dots, n$, $\psi_1=0$. Числовой пример расчета U_k и ψ_k приводимый в этой статье, посвящен случаю $k_k=0$, $n=3$. Рассмотрим случаи $k_k=2$.

а) Путем подстановки в (4₂) значений $\psi_{k,co}^{(i)}$ получается следующая система уравнений, записанная относительно $U_d^{(i)}$

($a=3, 4, 5, 6$):

$$|A_{r,co}^{(i)}| \cdot |U_d^{(i)}| = \left| A_{r,co}^{(i)} - \sum_{k=1}^n U_k^{(i)} A_{rk,co}^{(i)} \right|, \quad (10)$$

где $r=1, 2, 3, 4$ —индекс строки; $a=3, 4, 5, 6$ —индекс столбца:

$$A_{1,co}^{(i)} = \frac{1}{U_1^{(i)}} - \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} A_{1d,co}^{(i)};$$

$$A_{k,co}^{(i)} = - \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} A_{kd,co}^{(i)};$$

$$A_{1,co}^{(0)} = \frac{1}{U_1^{(0)}} \cos \psi_{2,co}^{(0)} - \sum_{d=1}^2 U_d^{(0)} A_{2d,co}^{(0)};$$

$$A_{1,co}^{(1)} = \frac{1}{U_1^{(1)}} \sin \psi_{2,co}^{(1)} - \sum_{d=1}^2 U_d^{(1)} A_{2d,co}^{(1)};$$

Принимая обобщенный индекс, можно записать следующие выражения коэффициентов, входящих в уравнения (10).

$$A_{1f,co}^{(0)} = \alpha_{1f} \cos \psi_{f,co}^{(0)} + \beta_{1f} \sin \psi_{f,co}^{(0)};$$

$$A_{2f,co}^{(0)} = -\beta_{1f} \cos \psi_{f,co}^{(0)} + \alpha_{1f} \sin \psi_{f,co}^{(0)};$$

$$A_{1f,co}^{(1)} = \alpha_{2f} \cos \psi_{f,co}^{(1)} - \beta_{2f} \sin \psi_{f,co}^{(1)};$$

$$A_{2f,co}^{(1)} = -\beta_{2f} \cos \psi_{f,co}^{(1)} + \alpha_{2f} \sin \psi_{f,co}^{(1)}, \quad (10_1)$$

где $f = a, d, k$; $a = 3, 4, 5, 6$; $d = 1, 2$; $k = 7, \dots, n$;

$\alpha_1 = 0$; co — дополнительный индекс, указывающий на то, что в данной цепи расчета используются значения $\psi_{k,co}^{(0)}$, а не $\psi_{k,st}^{(0)}$, взятые согласно (8); $U_1^{(0)}; U_2^{(0)}$ — заданные напряжения.

Решение системы уравнений (10) относительно $U_a^{(0)}$ запишем в следующем виде

$$U_a^{(0)} = \sum_{r=1}^1 \frac{1}{\Delta} \Delta_{ra} (-1)^{r+a} \left(A_{r,co}^{(0)} - \sum_{k=7}^n U_k^{(0)} A_{rk,co}^{(0)} \right), \quad (11)$$

где Δ — определитель матрицы, $[A_{ra,co}^{(0)}]$;

Δ_{ra} — минор указанного определителя, соответствующий элементу $A_{ra,co}^{(0)}$;

$a = 3, 4, 5, 6$.

Выражение (11) может быть представлено и в следующей форме

$$U_a^{(0)} = R_a^{(0)} + \sum_{k=7}^n B_{ak,co}^{(0)} U_k^{(0)}. \quad (11_1)$$

б) Путем подстановки в систему (4₁) выражений $U_a^{(0)}$, взятых согласно (11₁), получаются следующие уравнения, необходимые для расчета i -го приближения к искомым напряжениям пар зажимов многополюсника:

$$U_{1,co}^{(i)} = U_1^{(0)} N_{1,co}^{(0)} + \sum_{k=7}^n U_k^{(0)} H_{1k,co}^{(0)} + U_k^{(0)} \sum_{k=7}^n U_k^{(0)} G_{1k,co}^{(0)} + \sum_{k=7}^n \sum_{r=7}^n U_k^{(0)} U_r^{(0)} Z_{rk,co}^{(0)}, \quad (12)$$

где

при $h = 1, 2, 3, 4$

$$\cos \varphi_{m, co}^{(i)} = \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} R_m^{(i)} A_{md, co}^{(i)} + \sum_{n=3}^6 R_n^{(i)} R_m^{(i)} A_{mn, co}^{(i)}$$

где $m = 3, 4, 5, 6$;при $h = 5, 6, 7, 8$ $\lambda_{hk, co}^{(i)}$

$$\sin \varphi_{m, co}^{(i)} = \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} R_m^{(i)} C_{md, co}^{(i)} + \sum_{n=3}^6 R_n^{(i)} R_m^{(i)} C_{mn, co}^{(i)}$$

где $m = 3, 4, 5, 6$ при $h = n - 1, n, \dots, n + 2$ $\cos \varphi_{m, co}^{(i)}$ где $m = 7, \dots, n$;при $h = n + 3, \dots, 2n - 4$ $\sin \varphi_{m, co}^{(i)}$ где $m = 7, \dots, n$ при $h = 1, 2, \dots, 8$;

$$\text{при } h = n - 1, n, \dots, n + 2 \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} A_{md, co}^{(i)} + \sum_{n=3}^6 R_n^{(i)} A_{mn, co}^{(i)}$$

где $m = 7, \dots, n$; $V_{hk, co}^{(i)}$

$$\text{при } h = n + 3, \dots, 2n - 4 \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} C_{md, co}^{(i)} + \sum_{n=3}^6 R_n^{(i)} C_{mn, co}^{(i)}$$

где $m = 7, \dots, n$;

$$\text{при } h = 1, 2, 3, 4 R_m^{(i)} A_{mk, co}^{(i)} + \sum_{d=1}^2 U_d^{(i)} A_{md, co}^{(i)} B_{mk, co}^{(i)} +$$

 $H_{hk, co}^{(i)}$

$$+ \sum_{n=3}^6 (R_n^{(i)} A_{mn, co}^{(i)} B_{mk, co}^{(i)} + R_m^{(i)} A_{mk, co}^{(i)} B_{nn, co}^{(i)})$$

где $m = 3, 4, 5, 6$;при $h = 5, 6, 7, 8$ взамен A берутся C с теми же индексами,при $h = n - 1, 2, \dots, 2n - 4$;при $h = 1, 2, \dots, 8$

$$\text{при } h = n - 1, n, \dots, n + 2 A_{mk, co}^{(i)} + \sum_{n=3}^6 B_{nk, co}^{(i)} A_{mn, co}^{(i)}$$

где $m = 7, \dots, n$; $G_{hk, co}^{(i)}$ при $h = n + 3, \dots, 2n - 4$, взамен A берутся C с теми же индексами.

$$\text{при } h = 1, 2, 3, 4 A_{mk, co}^{(i)} B_{nk, co}^{(i)} + \sum_{n=3}^6 A_{mn, co}^{(i)} B_{nk, co}^{(i)} B_{nn, co}^{(i)}$$

где $m = 3, 4, 5$. $\alpha_{hk, co}^{(i)}$ при $h = 5, 6, 7, 8$, взамен A берутся C с теми же индексами.при $h = n - 1, \dots, 2n - 4$.

Коэффициенты A и C , входящие в эти уравнения, выражаются так:

$$\begin{aligned} A_{mx,co}^{(0)} &= \alpha_{mx} \cos \psi_{x,co}^{(0)} + \beta_{mx} \sin \psi_{x,co}^{(0)}; \\ C_{mx,co}^{(0)} &= -\beta_{mx} \cos \psi_{x,co}^{(0)} + \alpha_{mx} \sin \psi_{x,co}^{(0)}, \end{aligned} \quad (12_1)$$

где $x = a, d, k$

Таким образом, система (12) состоит из $2n - 4$ уравнений с неизвестными вида $U_k^{(0)}$ и $U_m^{(0)}$, где $k, m = 7, \dots, n$.

В частном случае, при $n = 10$, число уравнений (12) равно 16, а число неизвестных вида $U_k^{(0)}$; U_k, U_m равно 14, а именно: $U_7; U_8; U_9; U_{10}; U_7 \cdot U_8; U_7 \cdot U_9; U_7 \cdot U_{10}; U_8 \cdot U_9; U_8 \cdot U_{10}; U_9 \cdot U_{10}; U_7^2; U_8^2; U_9^2; U_{10}^2$.

При $n = 7, 8, 9$ система (12) содержит, соответственно, 10, 12 и 14 уравнений, а число неизвестных равно 2, 5, 9. Таким образом, число располагаемых уравнений оказывается больше числа искомых величин вида $U_k^{(0)}$ и U_k, U_m . Для обеспечения быстроты сходимости предлагается из располагаемого состава уравнений выделить несколько групп (две — для случаев $n = 9, 10$; три — для случая $n = 8$ и пять — для случая $n = 7$) таким образом, чтобы каждое из располагаемых уравнений входило хотя бы в одну из образуемых групп. Это позволяет получить ряд значений для каждого из искомых величин $U_k^{(0)}$, которые, в свою очередь, могут быть использованы для нахождения некоторых средних значений каждого из U_k .

Так например, в случае $n = 10$, путем решения первых 14 уравнений, из числа 16 располагаемых, системы (12) можно найти по пять значений для каждого из $U_k^{(0)}$, где $k = 7, 8, 9, 10$, т. е. $U_k; \sqrt{U_k^2}$:

$\frac{U_k \cdot U_m}{\sqrt{U_m^2}}$ ($k, m = 7, 8, 9, 10, k \neq m$). Путем решения последних 14 уравнений, из числа 16 системы (12), можно найти еще по пять значений для каждого из $U_k^{(0)}$, т. е.

$$U_k; \sqrt{\frac{U_k \cdot U_m}{U_m^2}}; \frac{U_k \cdot U_m}{\sqrt{U_m^2}} \quad (k, m = 7, 8, 9, 10; k \neq m)$$

Из полученных 10 значений U_k может быть найдено некоторое среднее значение, например,

$$\begin{aligned} U_{k,co}^{(0)} &= \frac{1}{10} \left(U_k + \sqrt{U_k^2} + \sum_{\substack{q=7 \\ q \neq m}}^{10} \frac{U_k \cdot U_q}{\sqrt{U_q^2}} + U_k + \sqrt{U_k^2} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\substack{q=7 \\ q \neq m}}^{10} \frac{U_k \cdot U_q}{\sqrt{U_q^2}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Найденные $U_{k,co}^{(0)}$ рассматриваются в качестве одного из возможных приближений к искомым U_k . Очевидно, при определении $U_{k,co}^{(0)}$ не

обязательно учитывать все слагаемые, входящие в выражение вида (13). Второе из возможных приближений получается по такой же схеме расчета, но в качестве исходной информации используются, как было отмечено выше, не $\varphi_{k,co}^{(0)}$, а величина $\varphi_{k,u}^{(0)}$.

Таким путем вторая ветвь расчета, основанная на $\varphi_{k,co}^{(0)}$, приведет к значениям $U_{k,co}^{(i)}$, или $+V\sqrt{(U_k^*)_{co}^2}$.

Вопрос выбора одного из значений $U_k^{(i)}$, т.е. $U_{k,co}^{(i)}$ или $U_{k,u}^{(i)}$ в качестве расчетной величины i -го приближения к искомым U_k , может быть решен по признаку наименьшей алгебраической суммы их отклонения от величины $U_k^{(i-1)}$, т.е. соответствующего расчетного U_k предшествовавшего $i-1$ -го приближения например,

$$\varphi_{k,co}^{(i)} = \sum_{k=1}^n (U_{k,co}^{(i-1)} - U_k^{(i)}) \text{, для } \varphi_{k,u}^{(i)} = \sum_{k=1}^n (U_k^{(i-1)} - U_{k,u}^{(i)}) \quad (14)$$

Принятая величина $U_k^{(i)}$ используется для расчетов последующего $i+1$ -го приближения к искомым φ_k , т.е. для расчетов $\varphi_k^{(i+1)}$.

Последнее приближение к искомым U_k и φ_k

Одним из критериев для принятия решения о прекращении расчета может быть использована величина допустимой суммы абсолютной погрешности в определении модулей напряжения всех пар зажимов многополюсника в двух последовательных шагах приближений, а именно,

$$\delta_u \leq \sum_{k=1}^n |U_k^{(z)} - U_k^{(z-1)}|, \quad (15)$$

где z — индекс последнего шага итерации;

δ_u — заданная погрешность в определении U_k ;

k — индекс пар зажимов многополюсника.

Проиллюстрируем предлагаемый алгоритм примером числового расчета U_k , φ_k .

Пример. Задана схема замещения системы, показанная на рис. 7,17 широко известной работы П. С. Жданова [1]. Параметры эквивалентного шестиполюсника, определенные по методике [2] с использованием исходных Y -параметров указанной схемы замещения, оказались следующими:

km	11	12	13	22	23	33
y_{km}	1,2290	0,5483	0,5054	1,9810	0,9741	2,2510
φ_{km}	85°29'	78°42'	—85°56'	80°48'	82°37'	74°35'

Заданы также следующие величины активных (P) и реактивных (Q) мощностей источников э.д.с. подключенных к указанному шестиполюснику:

$$P_1 + jQ_1 = 0,4429 + j0,3372;$$

$$P_2 + jQ_2 = 0,8414 + j0,7792;$$

$$P_3 + jQ_3 = 0,9365 + j0,8449.$$

Требуется определить модули (U_k) и аргументы (ψ_k) комплексных напряжений, возникающих на зажимах указанного 6-полюсника в установившемся его режиме. Пользуясь изложенной методикой расчета, принимаем $\psi_1 = 0$. В качестве нулевого приближения к искомым U_k примем некоторые $U_k^{(0)}$, отличающиеся от истинных значений U_k в пределах $\pm 10\%$, а именно: $U_1^{(0)} = 1,1$ (против $U_1 = 1,24$); $U_2^{(0)} = 1,34$ (против $U_2 = 1,24$) и $U_3^{(0)} = 1,20$ (против $U_3 = 1,175$).

а. *Первое приближение к искомым ψ_k .* Подстановкой принятых величин $U_k^{(0)}$ в уравнения вида (6) получают следующие уравнения относительно неизвестных $\cos \psi_k^{(1)}$ и $\sin \psi_k^{(1)}$.

$$0,3257 = 0,1607 \cos \psi_{2,c}^{(1)} - 0,8014 \sin \psi_{2,c}^{(1)} + 0,0513 \cos \psi_{3,c}^{(1)} - 0,7209 \sin \psi_{3,c}^{(1)}$$

$$1,1493 = 0,8014 \cos \psi_{2,s}^{(1)} + 0,1607 \sin \psi_{2,s}^{(1)} + 0,7209 \cos \psi_{3,s}^{(1)} + 0,0513 \sin \psi_{3,s}^{(1)}$$

$$0,1607 = -0,2954 \cos \psi_{2,c}^{(1)} + 2,8379 \sin \psi_{2,s}^{(1)} + 0,2214 \cos \psi_{3,c}^{(1)} - 1,7079 \sin \psi_{3,c}^{(1)}$$

$$-0,8044 = -2,8379 \cos \psi_{2,c}^{(1)} - 0,2954 \sin \psi_{2,s}^{(1)} + 1,7079 \cos \psi_{3,c}^{(1)} + 0,2214 \sin \psi_{3,s}^{(1)}$$

Решение этой системы дает: $\cos \psi_{2,c}^{(1)} = 0,7567$, $\sin \psi_{2,c}^{(1)} = -0,1052$, $\cos \psi_{3,c}^{(1)} = 0,7815$ и $\sin \psi_{3,c}^{(1)} = -0,1102$.

Подстановкой $U_k^{(0)}$ в уравнения вида (7) получается система из четырех уравнений, в которой первыми двумя служат последние два уравнения вышеприведенной системы, при условии замены индексов c на ss , а s на cs , и двумя другими уравнениями — следующие.

$$-0,0513 = 0,2214 \cos \psi_{2,cs}^{(1)} - 1,7079 \sin \psi_{2,cs}^{(1)} + 0,0746 \cos \psi_{3,cs}^{(1)} + 2,8221 \sin \psi_{3,cs}^{(1)}$$

$$-0,7209 = 1,7079 \cos \psi_{2,cs}^{(1)} + 0,2214 \sin \psi_{2,cs}^{(1)} - 2,8221 \cos \psi_{3,cs}^{(1)} + 0,0746 \sin \psi_{3,cs}^{(1)}$$

Решение полученной системы вида (7) дает:

$$\cos \psi_{2,cs}^{(1)} = 0,6750$$
, $\sin \psi_{2,cs}^{(1)} = -0,1416$; $\cos \psi_{3,cs}^{(1)} = 0,6480$; $\sin \psi_{3,cs}^{(1)} = -0,1739$.

Далее пользуясь выражением (8) путем усреднения полученных выше величин $\cos \psi$ и $\sin \psi$ находим:

$$\cos \psi_{2,co} = 0,7158$$
, $\sin \psi_{2,ci} = -0,1234$, $\cos \psi_{3,co} = 0,7147$, $\sin \psi_{3,ci} = 0,1420$.

По этим значениям находятся величины углов синусной ветви

$$\psi_{2,ci}^{(1)} = -7^\circ 05'$$
, $\psi_{3,ci}^{(1)} = -8^\circ 10'$ и косинусной ветви $\psi_{2,co}^{(1)} = -44^\circ 17'$,

$$\psi_{3,co}^{(1)} = -44^\circ 23'$$
 для первого шага приближения.

Ниже приводится ветвь расчета, соответствующая величинам $\psi_k^{(1)}$.

б. *Первое приближение к искомым U_k .* Путем подстановки $\psi_k^{(1)}$ в уравнения вида (9) получится следующая система, решение которой дает первые приближения $U_k^{(1)}$, $U_m^{(1)}$, где $k, m = 1, 2, 3$.

$$\begin{aligned}
& 1,4684 U_1^{(1)} U_1^{(1)} - 0,3151 U_1^{(1)} U_2^{(1)} - 0,3814 U_1^{(1)} U_3^{(1)} = 1 \\
& -1,6615 U_1^{(1)} U_1^{(1)} + 0,9378 U_1^{(1)} U_2^{(1)} + 0,8283 U_1^{(1)} U_3^{(1)} = 0 \\
& -0,2343 U_1^{(1)} U_2^{(1)} + 1,1611 U_2^{(1)} U_2^{(1)} - 0,3620 U_2^{(1)} U_3^{(1)} = 0,9923 \\
& 0,4029 U_1^{(1)} U_3^{(1)} - 1,2196 U_2^{(1)} U_2^{(1)} + 0,7447 U_2^{(1)} U_3^{(1)} = 0,1234 \\
& -0,2466 U_1^{(1)} U_3^{(1)} - 0,3575 U_2^{(1)} U_3^{(1)} + 1,3532 U_3^{(1)} U_3^{(1)} = 0,9899 \\
& 0,3158 U_1^{(1)} U_3^{(1)} + 0,9841 U_2^{(1)} U_3^{(1)} - 1,1637 U_3^{(1)} U_3^{(1)} = -0,1420
\end{aligned}$$

Решением этой системы служат:

$$\begin{aligned}
U_1^{(1)} U_1^{(1)} &= 1,1381 \quad U_2^{(1)} U_2^{(1)} = 1,7562 \quad U_3^{(1)} U_3^{(1)} = 1,2663 \\
U_1^{(1)} U_2^{(1)} &= 1,7093 \quad U_1^{(1)} U_3^{(1)} = 0,3475 \quad U_2^{(1)} U_3^{(1)} = 1,7853.
\end{aligned}$$

В качестве расчетных принимаются величины $1/\sqrt{U_k^{(1)} U_k^{(1)}}$, как наиболее близкие к $U_k^{(0)}$, т. е.

$$U_1^{(1)} = 1,0668; \quad U_2^{(1)} = 1,3252 \quad U_3^{(1)} = 1,1253.$$

в. Последующие приближения к искомым U_k и U_k получаются аналогичным способом. Ниже в табличной форме приводятся результаты полученных приближений $U_k^{(n)}$ и $U_k^{(n)}$.

$l =$	0	1	3	10	20	$n = 27$
$U_2^{(l)}$	—	—7°05'	—3°48'	—1°53'	—1°35'	—1°30'
$U_3^{(l)}$	—	—8°10'	—5°21'	—4°11'	—4°14'	—4°17'
$U_1^{(l)}$	1,10	1,0668	1,1656	1,2292	1,2383	1,2404
$U_2^{(l)}$	1,36	1,3252	1,2828	1,2512	1,2426	1,2403
$U_3^{(l)}$	1,30	1,1253	1,1477	1,1640	1,1719	1,1747

В 1-ом столбце приводятся истинные значения U_k и U_k , удовлетворяющие уравнениям (1).

Изложенная выше методика расчета комплексных напряжений пар зажимов многополюсника обладает тем недостатком, что процесс последовательных приближений к истинным значениям оказывается относительно медленным. В следующем сообщении автора будет изложен способ ускорения этого процесса. Применение последнего позволило, например получить решения рассмотренной выше задачи при $n = 11$.

2. Տ. ԱԳՈՆՑ

ԲԱԶՄԱԹԵՆՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՀԱՆՎՈՐԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

Բազմաբևեռական զույգ բեռների կոմպլեքս լարումների հաշվումը, ըստ նրան միացված կենթալայնի աղբյուրի արված տկտիվ և ունակտիվ հզորությունների

$$P_{\text{մ փ և փ ո ւ փ}}$$

Տրվում են բազմաբևեռական պարամետրները (Y_{km} , Z_{km}), նրա սեղմակներին միացված աղբյուրների ակտիվ ($P_{\text{ու}}$) և ունակտիվ ($Q_{\text{ու}}$) հզորությունները: Պահանջվում է որոշել բազմաբևեռական սեղմակների կոմպլեքս լարումների մոդուլներն (U) ու արգումենտները (ψ), Թվարկած մեծությունների միջև եղած կախումը որոշող հալոսարումներն ունեն (1) տեսքը:

Առաջարկվող հաշվման մեթոդը հանդիսանում է խանրատիվ և հիմնվում է հալոսարումների մի սխառնի լուծումների հաջորդական օգտագործման վրա, որպես նախնական տվյալներ հալոսարումների երկրորդ սխառնի լուծման համար, և հակառակը:

Հոդվածում բերվում է թվային հաշվման օրինակ, մեկ վեցբևեռական համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Житнов Н. С. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1948.
2. Азюнц Г. Т. К теории и методам расчета многополюсника. Известия АН Армянской ССР, серия ТН, № 5, 1964.

ЭНЕРГЕТИКА

Г. А. АЙРАПЕТЯН

УРАВНЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ДЕМПФЕРНЫМИ
КОНТУРАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Для исследования режимов сложных энергосистем с помощью современных вычислительных машин требуется подробное описание процессов в различных элементах энергосистемы при помощи алгебраических и дифференциальных уравнений. Как известно, широко распространенной формой записи уравнений синхронной машины являются уравнения, полученные путем преобразования переменных фазовых величины в величины осей d , q , 0 , известные под названием уравнений Парка-Горевца [1]. Принятие ряда допущений позволяет упростить указанную систему уравнений. Во многих случаях оказывается достаточным и удобным запись уравнений для комплексных величин, напряжений и токов. Так например, для машины без демпферных обмоток известны следующие уравнения переходных процессов [2]:

$$\begin{aligned} E_q &= E_q' - T_{d0} \frac{dE_q'}{dt} \\ E_d &= E_d' + T_{d0} \frac{dE_d'}{dt} \\ T_{\infty} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= P_s - P_e \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем приняты следующие условные обозначения

I — ток статора; U — напряжение шин генератора; E — э.д.с.; X — реактивное сопротивление; T — постоянная времени контура; ψ — потокосцепление; δ — угол сдвига ротора; P — активная мощность; $\dot{P}$ — знак дифференцирования; Δt — время одного шага расчета.

Индексы внизу: u — контур статора; f — контур возбуждения; 1 — демпферный контур; d и q — продольная и поперечная оси; t — турбина; e — электрическая; s — от принужденного тока возбуждения; e — без учета влияния демпферной обмотки на статор; 0 — при разомкнутом статоре.

Индексы сверху: $'$ — переходное значение; $''$ — сверхпереходное значение

Уравнения (1) базируются на требованиях: мгновенного изменения потокосцепления статора, неучета активного сопротивления stato-

ра и учета изменения величины синхронной скорости при определении э.д.с. вращения. Как известно, большой круг задач по исследованиям электромеханических переходных процессов удовлетворяет этим требованиям. Весьма важно сохранить такую форму записи уравнений для машин с демпферными контурами, так как дополнительный учет асинхронного момента в сложных системах встречает затруднения. Такую форму уравнений удалось получить из уравнений Парка-Горева при принятии помимо вышеуказанных допущений, еще допущения, заключающегося в пренебрежении влиянием переходного процесса обмотки возбуждения на переходный процесс в демпферной обмотке, имея в виду, что постоянная времени обмотки возбуждения значительно больше постоянной времени демпферной обмотки.

Ниже приводится полученная система уравнений, описывающая переходные процессы синхронного генератора с демпферными контурами по обоим осям.

$$\begin{aligned}
 E_{qc} &= E_{qc} + (E_{qc} - U_q) \frac{X_d - X_d'}{X_d'}; \\
 E_q &= E_q + (E_q - U_q) \frac{X_d' - X_d}{X_d}; \\
 E_d &= E_d + (E_d - U_d) \frac{X_d - X_d'}{X_d'}; \\
 E_{qc} &= E_{dc} + T_{do} \frac{dE_{qc}}{dt}; \\
 E_{qc} &= E_q + T_{do} \frac{dE_{qc}}{dt}; \\
 0 &= E_d + T_{do} \frac{dE_d}{dt}; \\
 T_d \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= P_1 - P_2.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Для вывода такой формы уравнений воспользуемся выражением фиктивной э.д.с. за сверхпереходными продольными и поперечными реактивными сопротивлениями машины, описанные согласно [2] через потокосцепления и собственные и взаимные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned}
 E_q &= \frac{\dot{\psi}_{fd} (X_{11d} \cdot X_{afd} - X_{fd} \cdot X_{ad}) + \dot{\psi}_{ld} (X_{fd} \cdot X_{ad} - X_{fd} \cdot X_{afd})}{X_{fd} X_{11d} - X_{fd}^2}; \\
 E_d &= -\dot{\psi}_{ld} \frac{X_{ad} - X_{11q}}{X_{11q}}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Далее можно записать следующие уравнения для напряжений:

$$U_q = E_q - I_d X_d \tag{4}$$

$$U_d = E_d + I_q X_q. \tag{5}$$

Из совместного решения уравнений, определяющих потокосцепление контуров

$$\psi_d = i_d X_{afd} + i_{fd} X_{afd} - I_d X_d; \quad (6)$$

$$\psi_{fd} = i_d X_{ffd} + i_{fd} X_{ffd} - I_d X_{afd}, \quad (7)$$

имеем

$$\psi_d = \psi_{fd} \frac{X_{afd}}{X_{ffd}} + i_{fd} \left(X_{afd} - \frac{X_{ffd} \cdot X_{afd}}{X_{ffd}} \right) - I_d \left(X_d - \frac{X_{afd}^2}{X_{ffd}} \right). \quad (8)$$

Входящий в это выражение первый член аналогичен э.д.с. за переходным сопротивлением машины без демпферных обмоток. В данном случае он выражает э.д.с. машины без учета влияния демпферных обмоток на статор

$$\psi_{fd} \frac{X_{afd}}{X_{ffd}} \equiv E'_{qc}. \quad (9)$$

Имея в виду также равенство

$$I_d \left(X_d - \frac{X_{afd}^2}{X_{ffd}} \right) = I_d X'_d \quad (10)$$

можно записать для потокосцепления по оси d

$$\psi_d = E'_{qc} - I_d X'_d + i_{fd} \left(\frac{X_{afd} X_{ffd} - X_{ffd} X_{afd}}{X_{ffd}} \right); \quad (11)$$

потокосцепление по оси q

$$\psi_q = i_{fd} X_{aqd} - I_q X_q. \quad (12)$$

Принятые ранее допущения означали:

$$U_d = -\psi_q; \quad (13)$$

$$U_q = \psi_d. \quad (14)$$

Тогда для оси d , в силу (4) и (11), получим:

$$E'_q = E'_{qc} - I_d (X'_d - X_d) + i_{fd} \left(\frac{X_{afd} X_{ffd} - X_{ffd} X_{afd}}{X_{ffd}} \right). \quad (15)$$

Из уравнения для продольного демпферного контура, составленного по второму закону Кирхгофа, имеем:

$$i_{fd} = - \frac{p \psi_{fd}}{R_{fd}}. \quad (16)$$

Далее из (3) определим значение ψ_{fd}

$$\psi_{fd} = \frac{E'_d (X_{ffd} X_{afd} - X_{afd}^2) - \psi_{fd} (X_{ffd} X_{afd} - X_{afd} X_{ffd})}{X_{ffd} X_{afd} - X_{afd} X_{ffd}}. \quad (17)$$

Откуда

$$p \psi_{fd} = p E'_d \frac{X_{ffd} X_{afd} - X_{afd}^2}{X_{ffd} X_{afd} - X_{afd} X_{ffd}} - p \psi_{fd} \frac{X_{ffd} X_{afd} - X_{afd} X_{ffd}}{X_{ffd} X_{afd} - X_{afd} X_{ffd}}. \quad (18)$$

Пренебрегая влиянием переходного процесса обмотки возбуждения на переходный процесс в демпферной обмотке, приравнявая нулю второе слагаемое правой части (18), находим:

$$p\psi_{1d} = pE_q^* \frac{X_{f1d} X_{11d} - X_{11d}^2}{X_{f1d} X_{ad} - X_{11d} X_{af d}}. \quad (19)$$

Теперь запишем выражение (15) с учетом (16) и (19)

$$\begin{aligned} E_q^* &= E_{qc}^* - I_d (X_d^* - X_d) - \frac{pE_q^* (X_{f1d} X_{11d} - X_{11d}^2)}{R_{1d} X_{f1d}} \\ &= E_{qc}^* - I_d (X_d^* - X_d) - p E_q^* \frac{X_{11d} - \frac{X_{11d}^2}{X_{f1d}}}{R_{1d}} \end{aligned} \quad (20)$$

Пользуясь выражением постоянной времени демпферной обмотки при разомкнутом статоре и замкнутой обмотке возбуждения

$$T_{d0}^* = \frac{X_{11d} - \frac{X_{11d}^2}{X_{f1d}}}{R_{1d}}, \text{ где } T_{d0} = T_d^* \frac{X_d}{X_d^*},$$

получим

$$E_q^* = E_{qc}^* - I_d (X_d^* - X_d) - p E_q^* T_{d0}^*. \quad (21)$$

Заметим, что значение E_{qc}^* в (21) соответствует машине без демпферных обмоток и следовательно определяется уравнением (1). В (21) E_{qc}^* для демпферной обмотки по оси d , может рассматриваться, как стационарное значение э.д.с. за переходным сопротивлением, учитывающей стационарный и свободный токи обмотки возбуждения (аналогично E_{qc} в (1)).

При учете свободных токов в демпферной обмотке для э.д.с. за переходным сопротивлением воспользуемся общепринятым обозначением E_q . Тогда, учтя равенство

$$E_q = E_q^* + I_d (X_d - X_d^*) \quad (22)$$

вместо (21) можно написать

$$E_{qc} = E_q + T_{d0} \frac{dE_q}{dt}, \quad (23)$$

что аналогично (1).

Здесь E_{qc} определяется из уравнения

$$E_{qc} = E_{qc}^* + T_{d0} \frac{dE_{qc}^*}{dt}. \quad (24)$$

Из такого рассмотрения процесса вытекает практически важный вывод, заключающийся в возможности приближенного учета работы регуляторов напряжения и переходных процессов в роторе поддержанием постоянным значения E_{qc}^* с учетом процессов в демпферных обмотках.

Выражение аналогичное (23) может быть получено при рассмотрении обмотки оси q . Для этого в силу (5) и (13) получим:

$$-E_d = -I_q (X_q - X_q^*) + i_{1q} X_{d1q}. \quad (25)$$

Заменяя I_q выражением, аналогичным (16), получим:

$$-E_d' = -I_q (X_d - X_q) - p \psi_{1q} \frac{X_{d1q}}{R_{1q}} \quad (26)$$

Используя значение постоянной времени демпферной обмотки по поперечной оси при замкнутом статоре

$$T_{q0}' = \frac{X_{11q}}{R_{1q}}$$

получим

$$-E_d' = -I_q (X_d - X_q) - p \psi_{1q} T_{q0}' \frac{X_{d1q}}{X_{11q}} \quad (27)$$

Известно из [2], что

$$\psi_{1q} \frac{X_{d1q}}{X_{11q}} = E_d'$$

Тогда

$$E_d' = -I_q (X_d - X_q) + T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} \quad (28)$$

Учитывая также, что

$$E_d' - I_q (X_d - X_q) = E_d \quad (29)$$

окончательно аналогично (23) и (24) запишем

$$0 = E_d + T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} \quad (30)$$

Решение в конечных разностях уравнений (24), (23) и (30) имеет соответственно вид:

$$\Delta E_{ac} = \frac{E_{qc} - E_{qc}'}{T_{d0}} \Delta t; \quad (41)$$

$$\Delta E_q' = \frac{E_{qc} - E_q'}{T_{q0}'} \Delta t; \quad (42)$$

$$\Delta E_d' = \frac{-E_d}{T_{q0}'} \Delta t. \quad (43)$$

Для повышения точности расчета здесь может быть использовано увеличение постоянных времени на $\frac{\Delta t}{2}$, предложенное Кимбарком [3]

$$\Delta E_{qc}' = \frac{E_{dc} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - E_{qc}}{T_{d0} + \left(\frac{E_{qc}}{E_q'} \right) \frac{\Delta t}{2}} \Delta t; \quad (34)$$

$$\Delta E_q' = \frac{E_{qc} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - E_q'}{T_{q0}' + \left(\frac{E_q'}{E_d} \right) \frac{\Delta t}{2}} \Delta t; \quad (35)$$

$$\Delta E_d' = - \frac{E_d}{T_{q0}' + \left(\frac{E_d}{E_q'} \right) \frac{\Delta t}{2}} \Delta t. \quad (36)$$

Таким образом, оказываются известными уравнениями, описывающие переходные процессы в машине с демпферными обмотками, выраженные через э.д.с. за сверхпереходными сопротивлениями по обеим осям. Такая форма записи уравнений удобна при исследовании многогенераторных схем замещения энергосистем на автоматизированных моделях сетей переменного тока и на цифровых вычислительных машинах.

Применяемые в настоящее время уравнения с такими допущениями, основанные на принципе наложения мощностей, удобны при рассмотрении работы генератора на шину бесконечной мощности. Применение этих уравнений для многогенераторных схем замещения требует дополнительных допущений и значительно осложняет расчетные выражения.

АрмНИИЭ

Поступило 7 VII 1964

Կ. Ա. ԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆԸ

ԿԵՄՊԶԵՐԱՅԻՆ ՇՐՋԱԿՇԵՐՈՎ ՍԻՆԽՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԸ՝ ԷՆԵՐԳՈՍԻՏԵՐՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱՄԵԿԱՆԻԿԱԿԱՆ ԱՆՅՈՂՎԻ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԸ ՀԱՇՎԵԼՈՒ ՀԱՄԱՐ

Ա մ փ ո փ ո մ

Հոդվածում քերվում է զեմպֆերային շրջադիրով սինխրոն զեներատորի հավասարումների սխեման, որը հարմար է մասանակալից հաշվիչ մեքենաների ոգնությունը անցողիկ պրոցեսների հաշվման և տատանատիրության համար:

Հավասարումները դուրս բերելիս, բացի այն, որ հաշվի չի տրվում ստատորի ախտիվ զիմպրայիլունը, սինխրոն սրագություն մեծության փոփոխությունը պատման էնՍԻՒ-ի որոշման մասանակ, արհամարհված է դրոման փաթուլիի անցողիկ պրոցեսի ազդեցությունը զեմպֆերային փաթուլիի անցողիկ պրոցեսի վրա:

Ճրված է նաև զեներատորի հավասարումների սխեման լուծումը վերջավոր տարրերություններով: Հաշվման նշույնի թարծրոցման համար ոգապործվում է Կիմբարկի կողմից առաջարկված մեթոդը՝ մասանակի հաստատունի մեծացումը $\frac{\Delta t}{2} \cdot \omega$ չափը: Հոդվածում քերված հավասարումների դրոման

ներ հարմար է էներգոսխեմների թագմազեներատորային փոխարինման սխեմաների տատանատիրման համար՝ փոփոխական հոսանքի ախտմատագրված մոդելների և թվալին հաշվիչ մեքենաների վրա:

1. Горня А. А. Переходные процессы синхронной машины, Госэнергоиздат, 1950.
2. Лебедев С. А., Жданов П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем, Госэнергоиздат, 1934.
3. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость энергетических систем, Госэнергоиздат, 1957.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Д. О. АВЕТИСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРОВ НА БАЗЕ ПРИБОРОВ ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ

Нами разработан электрический пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор на базе приборов прямого измерения. Новый тип регулятора отличается от существующих простотой в изготовлении и удобством обслуживания в процессе эксплуатации. Регулятор может быть широко использован для автоматизации различных технологических процессов в металлургической, химической, текстильной, нефтяной промышленности, а также в ряде процессов производства пластмасс и синтетических смол. В отличие от существующих регуляторов, этот регулятор способен формировать законы регулирования в относительно узком спектре средних частот. В статье произведен анализ амплитудно-фазовой характеристики этого регулятора и определены частоты, при которых векторы амплитудно-фазовой характеристики регулятора на базе прибора прямого измерения совпадают с векторами амплитудно-фазовой характеристики идеального регулятора.

Описание работы и вывод передаточной функции регулятора

В основу схемы регулирующего устройства положена идея возможности получения на базе измерительного прибора так называемого гальванометрического усилителя, представляющего собой совокупность измерительного прибора и фотоэлектрического преобразователя.

Введение в подобный усилитель функциональной отрицательной обратной связи, охватывающей измерительную цепь, позволило создать регулятор с несомненно ценными свойствами, как например, независимость от изменения параметров элементов схемы и внешних влияний, отсутствие гальванической связи между входом и выходом, относительно высокая чувствительность, формирование законов регулирования в достаточно широком диапазоне частот и, что является наиболее важным, простота схемы. На рис. 1 приводится принципиальная схема ПИД регулятора.

Здесь R_{μ} — сопротивление измерительной рамки; W_1 — число витков измерительной рамки; $R_{\mu 2}$ — сопротивление рамки обратной связи; W_2 — число витков рамки обратной связи; R_n — сопротивление нагрузки; R_{ϕ} — фотосопротивление. Работа регулирующего устройства

Передаточная функция $K_{из.}(P)$ зависит от электрических, магнитных и механических параметров измерительного устройства. Учет всех этих параметров связан с трудоемким расчетом, в связи с чем $K_{из.}(P)$ определяется расчетно-экспериментальным путем. С этой целью снимается временная характеристика регулятора при отключенной обратной связи. Форма снятой характеристики (экспонента) дает право отнести ее к временной характеристике аperiodического звена первого порядка. Как известно, аperiodическое звено первого порядка характеризуется передаточной функцией следующего вида:

$$K_{из.}(P) = \frac{\Delta I_{из.}(P)}{\Delta I_{из.}(P)} = \frac{K_{из.}}{1 + T_0 P}, \quad (1)$$

где $K_{из.}$ — отношение установившихся значений выходной величины к входной;

T_0 — постоянная времени звена, равная отрезку прямой $X_{изм.} = X_{уст.}$, отсекаемого касательной к кривой переходного процесса в начале координат.

Передаточная функция $K_{обр.}(p)$ зависит от параметров цепи обратной связи, состоящей из комбинаций $R-C$ цепочек. Пользуясь законами Кирхгофа, рассчитываем передаточную функцию обратной связи:

$$K_{обр.}(p) = \frac{\Delta I_2(p)}{\Delta I_{изм.}(p)} = \frac{1}{AP + B + \frac{C}{p}}, \quad (2)$$

где

$$A = (R_1 + qR_n - q^2 R_a) \cdot \frac{c_1 \cdot r}{qR_n}; \quad B = \frac{(R_1 + qR_n - q^2 R_a)(c_1 + c_2)(R_2 + r)}{R_2 c_2 \cdot q \cdot R_n} + \frac{r}{qR_n}; \quad C = \frac{r + R_2}{R_2 \cdot c_2 \cdot q \cdot R_n} \quad (2a)$$

Здесь $q = \frac{R_{ср}}{R_{ан}}$ — коэффициент, определяющий глубину обратной связи (обозначения см. на рис. 1).

Чтобы вывести передаточную функцию всего регулирующего устройства необходимо согласовать входные каналы и сумматор. Функцию согласования выполняет масштабное звено, приводящее изменение тока обратной связи в канал действия входного тока:

$$W_2 \cdot \Delta I_2 = W_1 \cdot \Delta I_1;$$

$$\Delta I_1 = \Delta I_2 \cdot \frac{R_{из}}{R_{из} + R_{р1}};$$

Отсюда определяется коэффициент масштабного звена:

$$K_{с.} = \frac{\Delta I_1}{\Delta I_2} = \frac{R_{из} + R_{р1}}{R_{из}} \cdot \frac{W_2}{W_1}. \quad (3)$$

Передаточная функция замкнутого контура будет

$$K_{py}(p) = \frac{K_{из.}(p)}{1 + K_{из.}(p) \cdot K_{обр.}(p) \cdot K_n} \quad (4)$$

Идеальный регулятор

Для идеального случая, когда $K_{из.}(p) = \infty$ в силу (2), (3) и (4) получим:

$$K_{ид.}(p) = \frac{\left(Ap + B + \frac{C}{p}\right) R_{ш}}{(R_{ш.} + R_{pi})} \cdot \frac{W_1}{W_2} \quad (5)$$

Сопоставляя уравнение (5) с уравнением идеального ПИД регулятора в силу (2а) находим коэффициент пропорциональности:

$$k = \frac{R_{ш.} + R_{pi}}{R_{ш.}} \cdot \frac{q R_{ш.} c_2 R_2}{[R_1 + q R_{ш.} (1 - q)] \cdot (c_1 + c_2) (R_2 + r) + r R_2 c_2} \cdot \frac{W_2}{W_1}$$

время изотропии

$$T_{из} = [R_1 + q R_{ш.} (1 - q)] (c_1 + c_2) + \frac{r R_2 c_2}{r + R_2} \quad (5a)$$

и время предвращения:

$$T_* = \frac{[R_1 + q R_{ш.} (1 - q)] c_2 \cdot r \cdot R_2 c_2}{[R_1 + q R_{ш.} (1 - q)] (c_1 + c_2) (R_2 + r) + r \cdot R_2 c_2}$$

Значения k , $T_{из.}$ и T_* устанавливаются органами настройки q , R_1 , R_2 и, как видно из выражений (5), имеет место взаимозависимость между параметрами настроек.

Сопоставление амплитудно-фазовых характеристик идеального и реального регуляторов

В результате содержания инерционных звеньев, уравнения реальных регуляторов существенно отличаются от уравнения идеального регулятора. Большинство существующих реальных ПИД регуляторов имеют передаточную функцию следующего вида:

$$K_p(p) = \frac{\frac{1}{3} + \frac{1}{3T_m} \cdot \frac{1}{p} + \frac{1}{3} \cdot T_2 \cdot p}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2 + \dots} \quad (4a')$$

Амплитудно-фазовую характеристику определяем из (4a') заменой в передаточной функции p на $i\omega$

$$K_p(i\omega) = \frac{\frac{1}{3} + \frac{1}{3T_m i\omega} + \frac{1}{3} T_2 \cdot i\omega}{1 + T_1 i\omega + T_2^2 (i\omega)^2 + \dots}$$

Отсюда следует, что при высоких частотах различие между передаточными функциями реального и идеального регуляторов весьма

существенно. Чем ниже частота, тем ближе находятся векторы амплитудно-фазовых характеристик идеального и реального регуляторов. Согласно (4а') при $\omega \rightarrow 0$ и $K_p(p) \rightarrow \infty$ и коэффициент неравномерности системы регулирования $\delta_p = 0$.

Подставляя в уравнение (4) значения передаточных функций

$$K_{из}(p) = \frac{K_{из}}{1 + T_{из}p}; \quad K_{огр}(p) = \frac{1}{Ap + B + \frac{c}{p}} = \frac{1}{K_{огр}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{T_{огр}p}{\delta} + \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta T_{из}} \cdot \frac{1}{p}\right)}$$

и произведя ряд несложных преобразований, получим

$$K_{огр}(p) = \frac{\frac{1}{\delta} + \frac{T_{из}}{\delta}p + \frac{1}{\delta T_{из}} \cdot \frac{1}{p}}{1 + \left(\frac{1}{\delta} + \frac{T_{из}}{\delta}p + \frac{1}{\delta T_{из}} \cdot \frac{1}{p}\right) \frac{(T_{огр}p + 1)}{K_{из}}} \quad (4a)$$

Отсюда видно, что в отличие от регуляторов, имеющих передаточную функцию (4а') выражения (4а) существенно отличаются от идеального как при очень высоких, так и при очень низких частотах, и векторы амплитудно-фазовых характеристик этих регуляторов приближаются к векторам амплитудно-фазовых характеристик идеально-

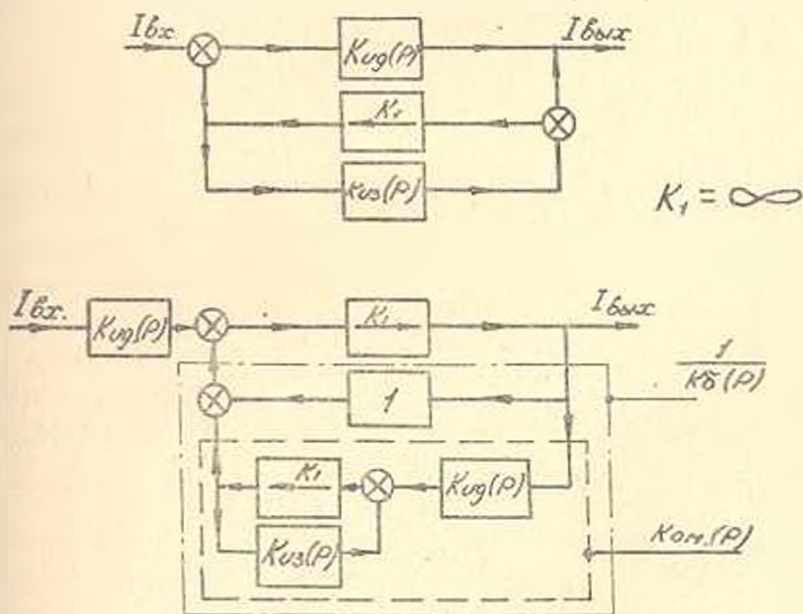


Рис. 3. Варианты структурных схем, представляющих реальный регулятор

го регулятора, только при относительно узком спектре средних частот.

При $\omega = 0$ имеем $K_{огр}(p) = K_{из} \neq \infty$. Это указывает на статичность систем регулирования ($\delta_p \neq 0$), работающих с регулятором на базе приборов прямого измерения.

К передаточной функции (4а) можно отнести следующие струк-

турные схемы (рис. 3). Из первого варианта следует, что реальный регулятор ведет себя как идеальный при всех частотах $0 < \omega < \infty$ только тогда, когда соблюдается условие $K_{из.}(p) = \infty$. Как следует из второго варианта, при $K_{из.}(p) = \infty$ (что имеет место в данном случае) также возможно некоторое совпадение амплитудно-фазовых характеристик реального и идеального регуляторов. Такое совпадение частично охватывает узкий спектр частот. Условие полного совпадения, как следует из второго варианта

$$K_{ом.}(p) = \frac{\left(\frac{T_0}{2}p + \frac{1}{2} + \frac{1}{2T_{из.}} \cdot \frac{1}{p}\right) \cdot (T_0p + 1)}{K_{из.}} = 0. \quad (61)$$

Здесь $K_{ом.}(p)$ передаточная функция „звена“ ошибок, или, что то же самое

$$K_1(p) = \frac{1}{1 + K_{из.}(p)} = 1.$$

В этом выражении $K_1(p)$ передаточная функция балластного звена, определяемая из уравнения

$$K_{пу.}(p) = K_1(p) \cdot K_{из.}(p).$$

Перейдем к построению амплитудно-фазовой характеристики, полученной из (6) подстановкой $p = i\omega$:

$$K_{ом.}(i\omega) = \frac{1}{2K_{из.}} \left(1 + \frac{T_0}{T_{из.}} - T_0 \cdot T_0 \omega^2 \right) + \frac{i}{2K_{из.}} \left[(T_0 + T_2)\omega - \frac{1}{T_{из.}\omega} \right] \quad (62)$$

При $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{T_{из.}(T_0 + T_2)}}$ амплитудно-фазовая характеристика пересекает ось абсцисс (частота фазового совпадения) в точке

$$Re_{ом.} = \frac{T_0 + \frac{T_0^2}{T_{из.}} + T_2}{2K_{из.}(T_0 + T_2)}.$$

При соблюдении условия $T_{из.} \gg T_0$ имеем:

$$Re_{ом.} = \frac{1}{2K_{из.}}.$$

При частоте $\omega_2 = \sqrt{\frac{T_{из.} - T_0}{T_0 \cdot T_{из.} \cdot T_2}}$ характеристика в точке

$$Im_{ом.} = \frac{1}{2T_{из.}} \sqrt{\frac{T_0(T_0 + T_{из.})}{T_{из.} \cdot T_2} + \frac{T_{из.} \cdot T_2}{T_0(T_0 + T_{из.})}} + 2 > \frac{2}{2K_{из.}}$$

пересекает ось ординат.

При низких частотах асимптотой является прямая

$$Re_{ом.} = \frac{1}{2K_{из.}} \cdot \frac{T_{из.} + T_2}{T_{из.}}$$

и при высоких — парабола

$$Re_{\text{ом}} = -\frac{1}{2} K_{\text{ом}} \cdot \frac{T_z \cdot T_0}{(T_0 + T_z)^2} \cdot i_m^2.$$

Следует обратить внимание на то, что при действительных положительных (попарно отличных от нуля) значениях T_z , $T_{\text{ин}}$ и T_0 нельзя удовлетворить уравнение $\omega_1 = \omega_2$. Следовательно, можно утверждать, что нет такой частоты, которая явилась бы корнем выражения (6а) и абсолютное совпадение между векторами амплитудно-фазовых характеристик идеального и реального регуляторов исключается.

На рис. 4. приведена амплитудно-фазовая характеристика звена ошибки. Показаны асимптоты. Здесь же построена обратная ам-

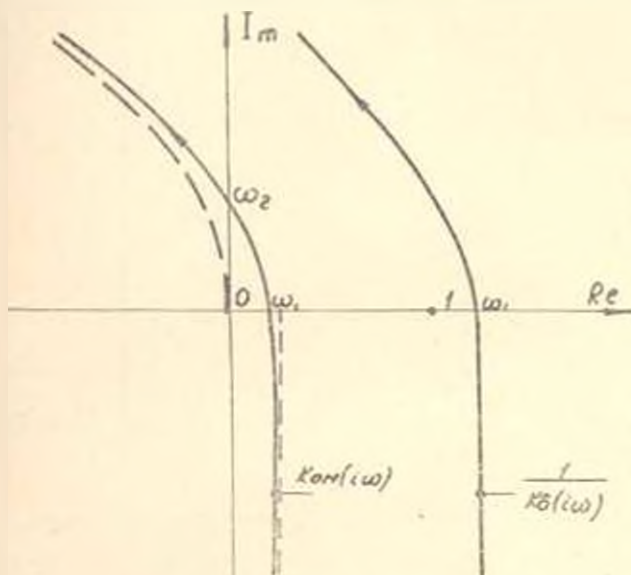


Рис. 4. Случай ПИД регулятора с инерционным усилителем

амплитудно-фазовая характеристика балластного звена $1/K_z(i\omega)$ полученная параллельным сдвигом направо на единицу амплитудно-фазовой характеристики $K_{\text{ом}}(i\omega)$. Обращением обратной амплитудно-фазовой характеристики балластного звена $\frac{1}{K_z(i\omega)}$ можно получить амплитудно-фазовую характеристику балластного звена $K_z(i\omega)$.

Исходя из вышесказанного, рассмотрим некоторые частные случаи.

1. Пропорционально-интегральный регулятор с инерционным усилителем $T_z = 0$. Для этого случая из (6а) имеем

$$K_{\text{ом}}(i\omega) = \frac{1}{2K_{\text{ом}}} \cdot \frac{T_{\text{ин}} + T_0}{T_{\text{ин}}} + \frac{i}{2K_{\text{ом}}} \cdot \left(T_{\text{ин}} - \frac{1}{T_{\text{ин}} \cdot \omega} \right).$$

Это уравнение прямой, параллельной оси ординат (рис. 5) про-

ходящей через точку $\left(I_m = 0, Re = \frac{1}{\partial K_{из.}} \frac{T_{из.} + T_0}{T_{из.}} \right)$ при частоте

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{1}{T_0 T_{из.}}}$$

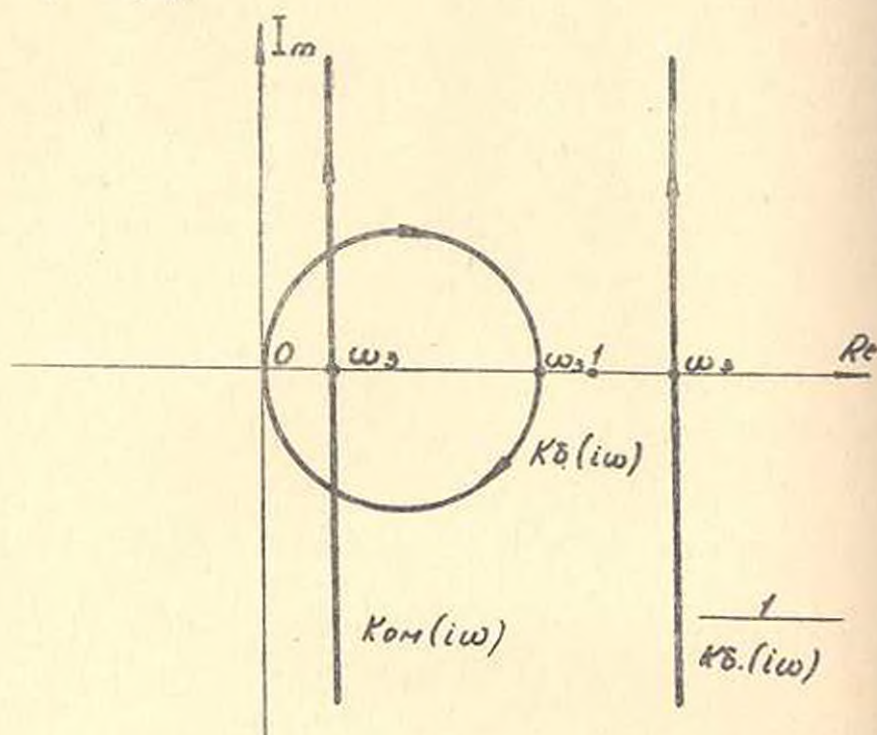


Рис. 5. Случай ПИ регулятора с инерционным усилителем.

2. Пропорционально-интегральный регулятор с практически безынерционным усилителем $T_a = 0, T_0 = 0$.

Для этого случая согласно (6а) имеем:

$$K_{ош.}(i\omega) = \frac{1}{\partial K_{из.}} - \frac{i}{\partial K_{из.}} \cdot \frac{1}{T_{из.}\omega}$$

Это уравнение отрезка прямой, параллельной оси ординат.

Пропорционально-интегральной с предварением регулятор с безынерционным усилителем $T_0 = 0$.

Для этого случая согласно (6а) имеем:

$$K_{ош.}^*(i\omega) = \frac{1}{\partial K_{из.}} + \frac{i}{\partial K_{из.}} \cdot \left(T_a \omega - \frac{1}{T_{из.}\omega} \right).$$

На рис. 6 приведены амплитудно-фазовые характеристики реального регулятора для различных значений $T_{из.}$, T_a , δ . Для сопоставления здесь же показаны амплитудно-фазовые характеристики идеального регулятора.

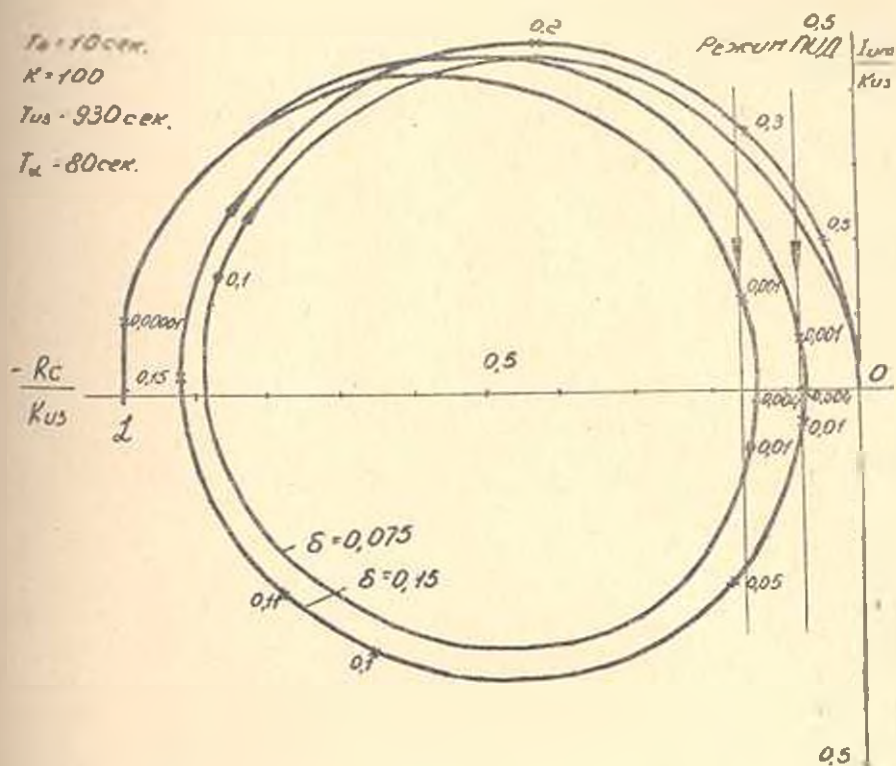


Рис. 6. Реальные амплитудно-фазовые характеристики регулятора в режиме ПИД.

2. ԱՆՍԻՄՈՅԱՆ

ԱՆՄԻՋԱԿԱՆ ՉԱՓԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ԲԱԶԱՅԻ ՎՐԱ ՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾ
ԿԱՐԳԱՎՈՐՈՋՆԵՐԻ ՀԱՃԱՆԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹՄԴՐԵՐԻ ՀՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո ւ լ ո լ մ

Մեր կողմից նախազգծվել ու պատրաստվել են Սովետական Միության մեջ առաջին էլեկտրական իզոդրոմ. դիֆերենցող կարգավորիչներ, անմիջա-
կան չափման սարքերի բազայի վրա:

Ի տարբերություն մինչև այժմ գոյություն ունեցող կարգավորիչների. նորատեսակների ամպլիստոգրա-ֆազային բնութագրերը համընկնում են իդեա-
լական կարգավորիչի բնութագրին միայն սրբշ, միջին հաճախականությու-
նների սպեկտրում:

Հոգսով չէի վրիպած է նոր կարգավորիչների դինամիկայի ուսումնասիր-
մանը, որի հիման վրա էլ որոշված են համընկման հաճախականությունների
արմկերները:

ТЕПЛОТЕХНИКА

И. Г. ТАРАНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ И АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОГО КРУГЛОГО
РАЗРЕЗНОГО РЕБРА

Большинство современных теплообменных аппаратов изготавливается из оребренных поверхностей, которые широко применяются в воздухо- и газоохладителях различных видов энергетических и силовых установок.

В последнее время находят применение моно- и биметаллические трубы с цельнокатанными винтовыми оребрениями. Теплообменники (холодильники) из этих труб с коэффициентом оребрения от 3 до 15 применяются в системе воздухоохладителей электрических машин, в электровазах переменного тока, в высокочастотных преобразователях, а также в газотурбинных установках и т. д. Повышение эффективности работы теплообменных аппаратов любого вида в настоящее время лимитируется в основном интенсивностью процессов конвективного теплообмена. Более эффективное использование теплообменной поверхности приводит к уменьшению габаритных размеров и количества затрачиваемого металла, а следовательно к снижению веса теплообменных аппаратов. Для эффективного уменьшения веса теплообменных аппаратов решающее значение имеет интенсификация процессов конвективного теплообмена.

Для интенсификации процесса конвективного теплообмена необходимо турбулизировать поток жидкости у поверхности тела так, чтобы получить минимальную толщину и максимальную степень турбулентности ламинарного пограничного слоя, при котором улучшаются условия перехода тепла от твердого тела к набегающему потоку. Из известных способов деформации пограничного слоя в данной работе рассматривается принцип начальных участков или метод коротких ребер. Один из вариантов для труб с продольными разрезами показан на рис. 1.

Интенсивность теплообмена можно значительно повысить, разрезая ребро на отдельные элементы малого размера, на которых не успевает образовываться ламинарный пограничный слой воздуха значительной толщины. Исследованием теплоотдачи и аэродинамического сопротивления разрезных продольных ребер с прямоугольным профилем занимался институт теплоэнергетики АН УССР [2]. В [2] исслед-

дованы различные варианты разрезного продольного ребра. Силошное продольное стальное ребро было разрезано (через определенные расстояния) до основания и полученные элементы отогнуты относительно оси потока под углом от 5 до 45 градусов. Авторы работы [2] пришли к выводу, что теплоотдача разрезного ребра с 5° углом разводки элементов больше теплоотдачи гладкого (неразрезного) ребра на 45%, а сопротивление больше в среднем на 14%. Дальнейшее увеличение

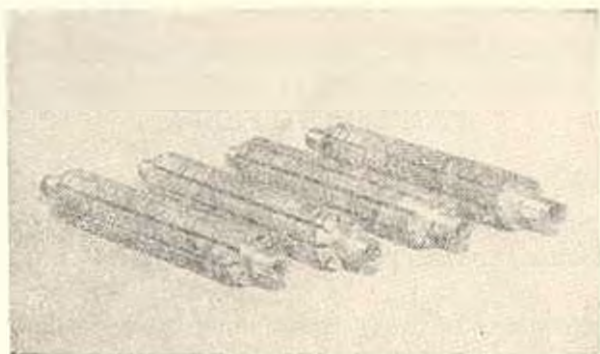


Рис. 1. Трубка с разрезными ребрами.

угла разводки элементов ребра от 5 до 45 практически не влияло на интенсивность теплоотдачи, а между тем сопротивление возросло от 75 до 220%. Обобщая результаты своих опытов по теплоотдаче и сопротивлению, авторы в [2] приходят к выводу, что оптимальный угол разводки равен 5°. Вопросы интенсификации процессов конвективного теплообмена поперечно обтекаемого разрезного круглого цельнокаганного ребра в последнее время занимался Армянский филиал ВНИИЭМ.

Для исследования теплоотдачи и аэродинамического сопротивления вюль цельнокаганной оребренной трубки фрезировались канавки. Количество разрезов в нашем опыте изменилось от 2 до 8, глубина — от нуля до основания ребра. Во всех опытах ширина разрезов оставалась постоянной ($\Delta = \text{const}$). Модели оребренной трубки имели следующие характеристики: внутренний диаметр базовой трубки $d_1 = 8$ мм; наружный диаметр $d = 12$ мм; диаметр по оребрению $D = 27,5$ мм; средняя толщина ребра $\delta = 0,5$ мм; высота ребра $h = 7,75$ мм; шаг между вершинами ребер $t = 3$ мм; коэффициент оребрения $\varphi = 9,5$.

Теплоотдачи и сопротивление исследовались в условиях нагревания воздуха, омывающего оребренную поверхность трубки, внутри которой протекала вода, нагретая до температуры 50—98°. Исследование теплоотдачи и сопротивления оребренной трубки производилось в разомкнутой аэродинамической трубе прямоугольной формы. Метод проведения исследования и схема установки были описаны в [3]. На основании измерений определялся общий коэффициент теплоотдачи K , а затем вычислялись значения коэффициента теплоотдачи со стороны воды и со стороны воздуха.

Коэффициент теплоотдачи со стороны воды, для развитого турбулентного режима течения в трубе вычислялся по формуле [1]:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr_n^{0.41} (Pr_n/Pr_{cm})^{0.25}, \quad (1)$$

а для переходного режима течения ($Re = 2 \cdot 10^3 - 10^4$), отличающегося неустойчивостью, по формуле

$$Nu = A \cdot Pr_n^{0.41} (Pr_n/Pr_{cm})^{0.25}. \quad (2)$$

В формуле (2) величина A находится в зависимости от числа Рейнольдса (Re) [1].

Коэффициенты теплоотдачи со стороны воды были доведены до $25000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ за счет сгеснения проходного сечения трубки. Благодаря этому основное термическое сопротивление переносу тепла сосредоточилось на наружной стороне исследуемого элемента. Поэтому погрешности, связанные с расчетным определением коэффициента теплоотдачи от тела к воздуху α , практически не отражаются на точности установленных значений коэффициента теплоотдачи для ребренной поверхности α . Благодаря сгеснению проходного сечения трубы температура поверхности базовой трубки практически была равна температуре воды, поэтому во многих опытах пришлось отказаться от непосредственного замера температуры стенки базовой трубки и ограничиться лишь только некоторыми контрольными замерами.

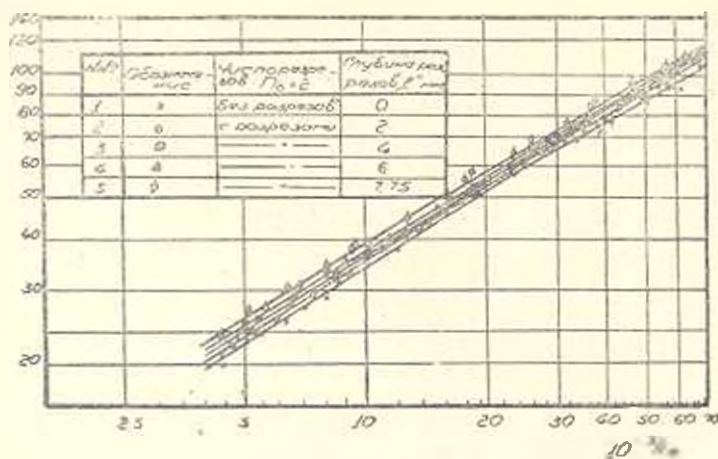
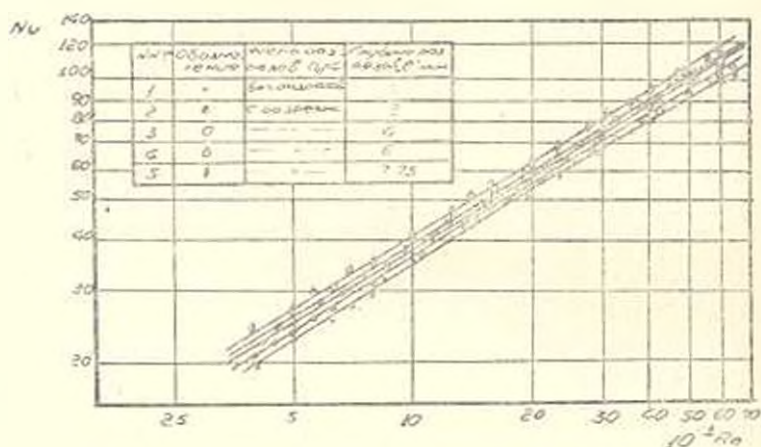
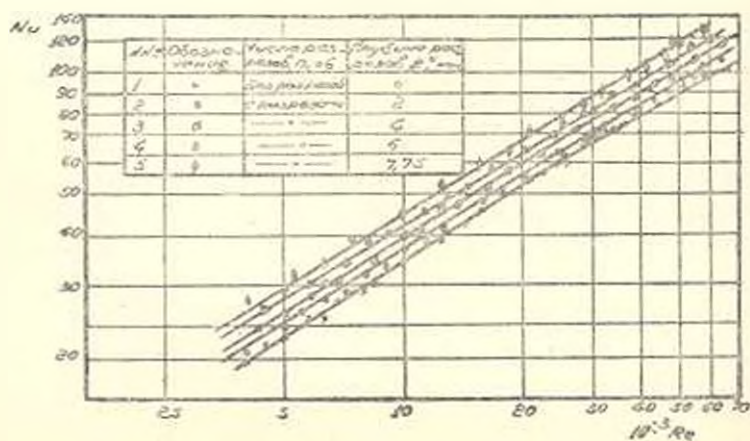
С целью обобщения результатов конечная обработка экспериментальных данных производилась в критериях теплового подобия. Для исследуемого случая конвективного теплообмена определяющими безразмерными величинами являются критерии Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), а также отношения глубины (l), ширины (Δ), разрезов и длины дуги между канавками (S) к наружному диаметру базовой трубки.

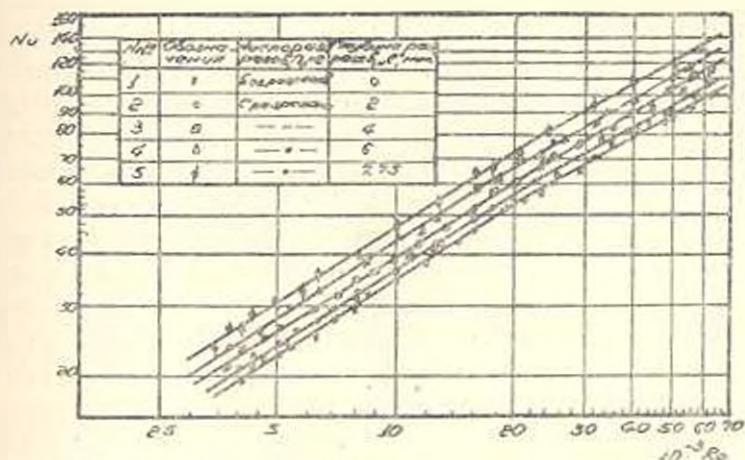
В первом этапе исследования влияние величины Δ/d на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление исключалось, так как опыты были проведены при постоянном отношении Δ/d . Поэтому окончательные результаты исследования устанавливались в виде следующей функциональной зависимости между критериями подобия Nu , Re , Pr и симплексами геометрических величин, характеризующими глубину, ширину и число разрезов ребренной трубки:

$$Nu = f(Re, Pr, l/d, s/d, \dots). \quad (3)$$

За определяющую температуру характеризующую физические параметры теплоносителя, принималась средняя температура потока. Как характерный линейный размер в критериях подобия Нуссельта (Nu) и Рейнольдса (Re) принят наружный диаметр базовой трубки. В критериях Re и Ейлера (Eu) скорость была отнесена к сжатому сечению рабочей части аэродинамической трубы, куда помещалась модель исследуемого элемента.

Результаты опытов по теплоотдаче представлены в логарифмической системе координат на рис. 2-5, где по оси абсцисс отложены значения критерия Re , а по оси ординат — критерия Nu .

Рис. 2. Зависимость $Nu = f(Re)$ при $s/d = 3.44$ и $l/d = 0.65$.Рис. 3. Зависимость $Nu = f(Re)$ при $s/d = 1.43$ и $l/d = 0.65$.Рис. 4. Зависимость $Nu = f(Re)$ при $s/d = 1.43$ и $l/d = 0.65$.

Рис. 5. Зависимость $Nu=f(Re)$ при $s/d=0,733$ при $l/d=0 \div 1,65$.

Из графиков видно, что для всех значений числа разрезав с увеличением глубины разрезав, т. е. с увеличением отношения l/d коэффициент теплоотдачи увеличивается. Сравнение результатов по теплоотдаче показывает, что коэффициент теплоотдачи при числе разрезав $n=2$ на 11,2% больше коэффициента теплоотдачи без разрезной трубки (т. е. $n=0$). Анализ показывает, что при малых значениях скорости набегающего потока воздуха в зависимости от глубины разрезав коэффициент теплоотдачи растет медленнее, чем при высоких значениях. Подобное явление замечается и при числе разрезав $n=1, 6$ и 8. Физическая сущность этого явления объясняется тем, что в интервале изменения l/d $0,166 \leq \frac{l}{d} \leq 0,333$ ламинарный пограничный слой

при наличии „микроребер“ возбуждается слабее, чем при значении $0,333 \leq l/d \leq 0,65$. При глубине разрезав $l/d=0,166$, когда число разрезав s/d изменяется в интервале $1,635 \leq s/d \leq 3,44$, рост коэффициента теплоотдачи происходит медленнее, чем в интервале изменения $0,733 \leq s/d \leq 1,635$. Из сравнения результатов вытекает, что при числе Рейнольдса $2000 \leq Re \leq 40000$ и $l/d=0,65$ в области изменения s/d $0,733 \leq s/d \leq 3,14$ коэффициент теплоотдачи по сравнению с коэффициентом теплоотдачи безразрезных ребер растет от 11,2 до 33,5%. При чем малое значение роста коэффициента теплоотдачи получается при максимальном значении s/d , т. е. при номинальном значении числа разрезав ($n=2$), а максимальное значение при минимальном значении s/d , а именно при $n=8$.

Так как интенсивность процесса теплообмена определяется характером движения в пограничном слое, то повышение значения коэффициента теплоотдачи следует объяснить возмущением пограничного слоя под действием сил, обуславливающих турбулентное движение в полостях ребер. Как видно из графиков рис. (2—5), в области развитого турбулентного движения потока воздуха ($4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 65 \cdot 10^3$)

при отношении $s/d = 3,44$ для всех значений l/d , коэффициент теплоотдачи остается постоянным, а для отношения $s/d < 3,44$ изменяется в зависимости от числа Рейнольдса. Это свидетельствует о том, что при больших значениях s/d и l/d более интенсивно разрушается ламинарный пограничный слой, чем при меньших значениях этих величин. Разрушенный пограничный слой под действием потока воздуха удаляется от поверхности ребер. В устье межреберного пространства происходит непрерывный интенсивный обмен. Интенсивный турбулентный захват приводит к уменьшению термического сопротивления с наружной стороны теплоотдающей поверхности. Другим обстоятельством, на которое необходимо обратить внимание, является монотонное убывание коэффициента теплоотдачи при значениях $s/d < 1,035$ и $l/d > 0,5$. Поэтому значительный интерес представляет исследование влияния ширины, а также увеличение числа разрезов на теплоотдачу. Увеличивая число разрезов до бесконечности, приходим к поверхности базовой гладкой трубки, при которой коэффициент теплоотдачи увеличивается, но уменьшается теплоотдающая поверхность. Следовательно, интенсификация процесса теплоотдачи за счет больших чисел начальных участков целесообразна только при оптимальном числе „микроребер“ и оптимальной ширине разрезов. В результате обобщения опытных данных по теплоотдаче трубки с круглыми разрезными ребрами в поперечном потоке воздуха при $\Delta = 2$ мм автором установлены следующие зависимости:

для значений

$$3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 20 \cdot 10^3, 0,166 \leq \frac{l}{d} \leq 0,33 \text{ и } 0,733 \leq \frac{s}{d} \leq 3,14$$

$$Nu = 0,119 Re^{0,58} (l/d)^{0,12} \cdot \left(\frac{s}{d}\right)^{0,12} Pr^{0,4}; \quad (4)$$

для значений

$$3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 20 \cdot 10^3, 0,333 \leq l/d \leq 0,65 \text{ и } 0,733 \leq \frac{s}{d} \leq 3,44,$$

$$Nu = 0,135 Re^{0,56} \cdot (l/d)^{0,12} \cdot (s/d)^{0,12} \cdot Pr^{0,4}; \quad (5)$$

для значений

$$20 \cdot 10^3 \leq Re \leq 6,5 \cdot 10^3, 0,166 \leq l/d \leq 0,5 \text{ и } 0,733 \leq \frac{s}{d} \leq 3,44,$$

$$Nu = 0,256 Re^{0,58} (l/d)^{0,12} (s/d)^{0,12} Pr^{0,4}; \quad (6)$$

и наконец, для значений

$$20 \cdot 10^3 Re \leq 6,5 \cdot 10^3, 0,5 \leq l/d \leq 0,55 \text{ и } 0,633 \leq \frac{s}{d} \leq 3,44$$

$$Nu = 0,268 Re^{0,58} \cdot (l/d)^{0,21} (s/d)^{0,21} Pr^{0,4}; \quad (7)$$

где

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}; \quad Re = \frac{w \cdot d}{\nu}; \quad Pr = \frac{\nu}{a};$$

$$S = \frac{\pi D - n \cdot \Delta}{n}; \quad (8)$$

D — наружный диаметр ребра; n — количество разрезов.

Определение аэродинамического сопротивления единичной трубки производилось методом взвешивания, разработанным в ЦАГИ, и методом замера перепада статистических давлений перед и за моделью. Экспериментальные данные по сопротивлению описываются следующими эмпирическими уравнениями:

для значений

$$3000 < Re < 12 \cdot 10^3; 0,733 < Re < 12 \cdot 10^2; 0,733 < \frac{s}{d} < 3,44$$

$$\text{при } \frac{l}{d} = 0,65,$$

$$\bar{E}_a = 0,776 Re^{-0,17}; \quad (9)$$

$$\text{а для значений } 12 \cdot 10^3 < Re < 8,5 \cdot 10^4, 0,733 < \frac{s}{d} < 3,44,$$

$$E = 0,337 \cdot Re^{-0,05}. \quad (10)$$

Резюмируя изложенное отметим, что при $\frac{l}{d} = 0,65$, когда число

Рейнольдса изменяется в интервале $3 \cdot 10^3 < Re < 65 \cdot 10^3$, а $\frac{s}{d}$ находится

в области $0,733 < \frac{s}{d} < 3,44$ коэффициент теплоотдачи разрезных ребер

по сравнению с коэффициентом теплоотдачи ребер не имеющих разрезов увеличивается на 28%. В указанных интервалах изменения $\frac{l}{d}$,

Re и $\frac{s}{d}$, коэффициент гидравлического сопротивления увеличивается лишь на 19%.

Армянский филиал ВНИИЭМ

Поступило 15. VI. 1964

Ի. Չ. ԲԱՐՍԵՂՅԱՆ

ԿՏՏՏՎԱԾՔՈՎ ԿԼՈՐ ԿՈՂԵՐԻ ՋԵՐՈՒՄՏՎՈՐԻՅԱՆ ԵՎ ԱԷՐՈԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ
ԿԻՐԱՌՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ ԹԵՐ ԼԱՅՆԱԿԱՆ ՀՈՍՔՈՎ
ՇԻՋՀՈՍԵԼԻՍ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Ժամանակակից բոլոր տեսակի էներգետիկ սարքավորումների մեջ լավի
կիրառություն են գտել ջերմափոխանակիչ ապարատները: Էներգետիկ և ու-
ժալիկ կալանքների համար ջերմափոխանակիչ ապարատների նախադժման

հիմքում ընկած է ջերմափոխանակման մակերևույթի ռադիոնալ ընտրություն հարցը: Մակերևույթի ռադիոնալ ընտրությունից և նրա հարադասությունից է կախված տաքացվող կամ հովացվող մակերևույթի օբյեկտի մաքանակման և կյանման ինտենսիվությունը:

Ջերմափոխանակիչ տպարարտները մեծ մասամբ ստրքում են կողավոր խողովակներից: Վերջին մասնակներու էներգետիկ սարքավորումների հովացման տպարարտներում լայն կիրառություն է ստացել երկմետաղյա և մեկ մետաղյա ամրողջական գլանված շրջանային կողերով կլոր խողովակները: Մեկ մետաղից կամ երկմետաղից բաղկացած խողովակի պլանման ժամանակ նրա արտաքին մակերևույթի վրա ստացվում են պտուտակաձև պտտավորված կլոր կողեր:

Այդպիսի կողեր անհեղձ խողովակների ջերմափոխան ինտենսիֆիկացմանն է նվիրված տվյալ հոդվածը: Ջերմափոխան ինտենսիվության բարձրացման հիմնական պայմանը լամինար ստհանային շերտի հետադուռն է: Նրա իրականացման համար դրություն ունեն մի շարք մեթոդներ: Առաջարկված մեթոդով համատարած կլոր կողերը կարտելով շտապիդի ուղղությամբ, այն տրոհվում է հատվածների, ալուպևս կոչված «միկրոկողերի», որոնք թույլ չեն տալիս կողերի արտաքին մակերևույթի վրա լամինար ստհանային շերտերի առաջացում:

Փորձի արդյունքները ընդհանրացված են կրիտերիայ մեծությունների օգնությամբ և բերված են բանաձևեր, որոնցով հնարավոր է հաշվարկել նման կողերով խողովակներից բաղկացած ջերմափոխանակիչներ, կախված կողերի կտրվածքի թվից, խորությունից և լայնությունից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.
2. Семилет З. В. и Буцкий Н. Д. Исследования теплоотдачи и сопротивления продольно обтекаемого разрезного ребра, «Холодильная техника», № 1, 1962.
3. Таранян И. Г. Известия АН Армянской ССР, серия технических наук, № 3, 1964.

Ш. А. ШАХБАЗЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО СТОКА РЕК АРАГАЦСКОГО МАССИВА

Статья посвящена определению величины подземного стока, который представляет собой составную часть речного стока и является одним из элементов водного баланса. В свою очередь, подземная составляющая складывается из стока нисходящих и восходящих родников, а также из фильтрационных вод от атмосферных осадков. Количественное определение величины подземной составляющей стока является одним из сложных вопросов гидрологии, в особенности для специфики республики со своеобразной геологией и богатой родниками. При решении вопроса были проанализированы и использованы все имеющиеся кадастровые данные по родникам (в количестве свыше 200) и по стоку рек Арагацского массива. При этом, в целях уточнения и проверки имеющихся материалов по дебиту и режиму родников в течение лета 1962 г. были проведены экспедиционные обследования в бассейне реки Касях и ее притоков — Гехарот, Амберд и Шахверд.

Величина подземной составляющей рек Арагацского массива была определена по методу Ф. А. Макаренко [1].

В рассматриваемом случае балансовое уравнение подземного стока будет иметь вид: $W_n = W_{н.р} + W_{г.с}$, где W_n — подземный сток; $W_{н.р}$ — сток родников, выходящих выше максимального горизонта воды в реке (нисходящие родники); $W_{г.с}$ — грунтовый сток, состоящий из вод, поступающих из водоносных горизонтов и восходящих в русле реки родников. Недостаток метода заключается в том, что режим всего подземного стока принимается аналогичным режиму нисходящих родников. Признавая этот недостаток неустранимым, для получения более точной картины подземного стока при использовании метода [1] необходимо соблюсти следующие условия: По всем родникам необходимо иметь данные по замерам режимным или визуальным; Период наблюдений над режимными родниками должен совпасть с периодом наблюдений над речным стоком; Для родников, имеющих визуальные наблюдения, должны быть определены колебания режима в % от максимума; Речной сток должен рассматриваться в естественном состоянии с учетом водозабора.

Следует отметить, что несмотря на небольшие колебания дебита родникового стока по сравнению с колебаниями расходов реки, для не-

которых родников в многоводном году они могут достичь до 90% (родники бассейна р. Амберд, рис. 1).

Многолетние данные расходов воды с учетом водозаборов на орошение рассматривались по р. Ксах на постах Апаран, Зовуни и Аштарак. К сожалению, условие однородности периода наблюдений не было возможности выдержать, так как режимные наблюдения над

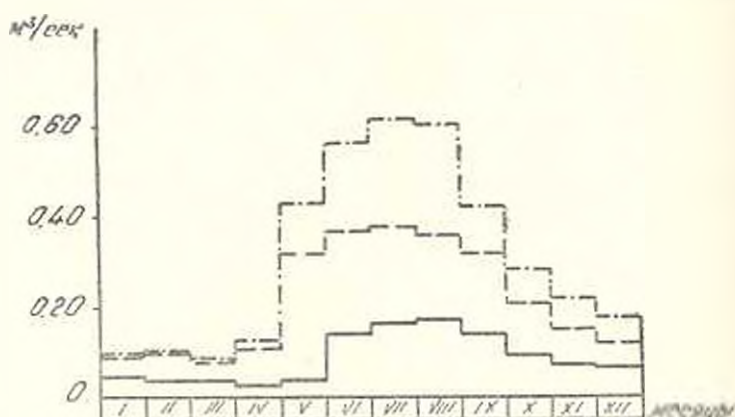


Рис. 1. Совмещенные графики режима родников бассейна р. Амберд для лет различной водности. — Маловодный год. ——— средний год ———— многоводный год.

родниками стали вестись значительно позже, чем над стоком реки. Самые ранние систематические наблюдения над дебитом родников в районе массива г. Арагац, проведенные гидрогеологической станцией Армянского геологического управления, относятся к 1945 г. Наиболее учащенные измерения охватывают период 1950–1957 годов. В силу такого разноречия в периодах наблюдений, для речного стока был взят гидрологический ряд, начиная с 1950 г. по 1960 г. По родникам же рассматривались средние многолетние данные за имеющиеся для каждого из них периоды наблюдений. Все родники были распределены по упомянутым выше участкам бассейна р. Ксах, а также по бассейнам притоков Амберд и Шахверд (табл. 1). При наличии на рассматриваемом участке родников с режимными наблюдениями, имеющими тот же процент отклонений, что и родники с визуальными наблюдениями, месячные распределения дебитов последних принимались аналогичными распределению дебита режимных родников с таким же процентом отклонений. Полученный объем родников стока, по-видимому, был несколько занижен, так как замеренный дебит и режим источников относится к месту их выхода на дневную поверхность, которое в отдельных случаях может находиться на значительном расстоянии. Поэтому не исключена возможность, что до попадания родниковых вод в реку они иногда профильтровываются в аллювиальные отложения рек или создают заболоченность (например, Назывранские родники в бассейне р. Шахверд), поступая в реку через гидравлически связанные с ней водоносные горизонты. Поскольку учесть эти потери без дополнительного обследования родников от места их

Таблица 1

Распределение дебита родников бассейна р. Касах по участкам

Участки	Дебит по визуальным наблюдениям л/сек	Максимальный дебит л/сек	Минимальный дебит л/сек	Количество родников			Дебит режимных родников	
				общее	режимных	режимных от общего количества в %	л/сек	%
До села Апаран	156	201	120	14	1	7	10	0,6
Апаран-Зовуни	750	830	820	40	6	15	643	86
Зовуни-Аштарак	657	705	610	33	8	24	517	79
Ниже села Аштарак	87	109	60	6	—	—	—	—
Шахерд	656	690	625	20	8	10	530	81
Амберд	239	335	105	7	—	—	—	—
Итого по бассейну реки Касах л/сек	2545	2870	2340	120	23	19	1700	67

выхода до непосредственного поступления в реку пока не представляется возможным, то за дебит исходящих родников приходится принимать дебит, замеренный на месте выхода родников. Следует заметить, что родники, расположенные на западном склоне Арагацкого массива (бассейны рр. Карангу, Гехадзор, Селав Мастара, Гарновит и Талинские родники в количестве 89 штук), менее изучены. По ним имеются лишь эпизодические замеры; режимные наблюдения не ведутся. Суммарный дебит этих родников составляет 1,33 м³/сек, а по всему массиву с учетом бассейна р. Касах родниковая составляющая равна 3,87 м³/сек.

С целью сравнения результатов, полученных при выделении подземного стока различными путями, было произведено расчленение гидрографов стока также по методу З. В. Джорджо [2].

Таблица 2

Сравнительная таблица подземной и поверхностной составляющих стока рек Арагацкого массива при расчленении гидрографов различными методами (в %)

Метод	Сток	р. Касах у Апарана	р. Касах у Зовуни	р. Касах у Аштарак	Гехадзор-Арагон	Амберд-устье	Шахерд-устье	Касах-устье	Карангу-Карно-тажик	Гарновит	Селав Мастара	Талинские родники	Итого по Арагц.-скому массиву
Материнко	Речной	100	100	100	—	100	100	100	100	—	—	—	100
	Подземный	38	48	56	—	23	62	57	52	—	—	100	57
	Поверхностный	62	52	44	—	77	38	43	48	—	—	—	43
Джорджо	Речной	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	—	100
	Подземный	35	51	52	32	26	89	56	48	36	45	100	55
	Поверхностный	65	49	48	68	74	11	44	52	70	55	—	45

Для наглядности в табл. 2 приводятся величины подземной и поверхностной составляющих стока рек Арагацского массива, полученные методами Макаренко и Джорджио для различных рек и створов.

Как следует из табл. 2, величина подземной составляющей колеблется в среднем за многолетие от 26% (р. Амберд) до 89% (р. Шахверд), а по отдельным годам могут быть еще более резкие колебания. Расхождение может дать также применение одного и того же метода для различных лет и периодов. Примером может слу-

жить подземный сток р. Касак у с. Аштарак за 1954 г., подсчитанный А. Н. Важновым [3] по методу [1]. По данным [3] эта величина составляет около 70% всего годового стока, в то время как по нашим подсчетам по той же методике за период с 1950 д. по 1960 г. эта величина равна 56%.

Таким образом, из 345 млн м³ стока по всему Арагацскому массиву величина подземной составляющей, вычисленная по методу Макаренко равна 197 млн м³, из которых 122 млн м³ приходится на долю родников. Распределение стока рек Арагацского массива на поверхностную и подземную составляющие приведено на рис. 2.

Величина подземного стока, полученная по методу Джорджио, того же порядка, что по Макаренко, и составляет 190 млн м³. Близ-

ки между собой также полученные по обоим методам результаты и по месячному распределению (табл. 4).

В процессе разработки методических указаний по оценке ресурсов (запасов) подземных вод для Арагатской долины в 1962 г. Н. Н. Веригинным была рекомендована схема выделения подземной составляющей речного стока, исходя из дат начала и конца половодья. При этом автор указывает эти даты с некоторым динамическим коэффициентом, являющимся функцией отношения продолжительности половодья к продолжительности подъема половодья. Построения по этому методу ведутся (для тех рек, в бассейнах которых имеются родники) на гидрографе реки от уровня родникового стока. Подземная составляющая, подсчитанная по последнему методу, получилась равной 176 млн м³, т. е. занижена на 20 млн м³. В этом случае заниженные значения подземной составляющей получены за счет ее умень-

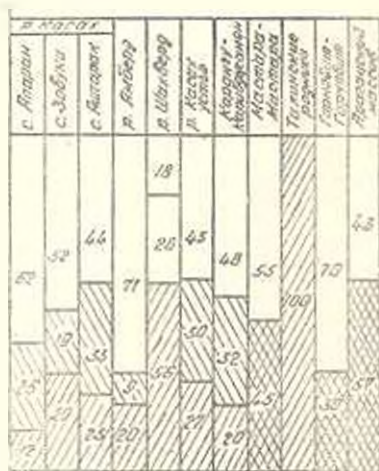


Рис. 2. Поверхностная и подземная составляющие стока по изученным створам рек Арагацского массива (в %): □ — родниковый сток; ▨ — сток грунтовых вод, поступающих из водопитных горизонтов и восходящих в бассейне родников; ▩ — поверхностный сток; ■ — подземный сток.

Таблица 3

Распределение подземного стока по Макаренко и Джорджно (в %, от среднегодового расхода)

Рек. пост	М е т о д	М е с я ц ы							Годовой расход реки м³/сек
		II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Алард	Макаренко Джорджно	29 29	35 29	35 30	43 35	45 37	48 40	48 43	0,60
Вавуни	Макаренко Джорджно	50 50	51 50	52 51	53 52	54 53	55 53	56 51	3,20
Ишарак	Макаренко Джорджно	52 52	52 52	54 53	60 53	62 53	63 53	65 53	6,96
Шахера	Макаренко Джорджно	82 84	82 91	82 91	84 91	83 91	83 92	85 92	1,19
Камберд	Макаренко Джорджно	14 19	12 23	18 24	40 37	16 31	49 38	45 42	1,18
Касак	Макаренко Джорджно	51 52	53 53	56 51	58 54	60 55	63 56	61 57	9,33

Таблица 4

Модульные коэффициенты подземного стока, определенные по Макаренко и Джорджно

Рек. пост	М е т о д	М е с я ц ы												Годовой расход по ГГО	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
п. Касак и истоки	Алард	Макаренко	0,76	0,76	0,92	0,92	1,13	1,18	1,25	1,25	1,20	1,02	0,85	0,79	0,30
		Джорджно	0,82	0,82	0,82	0,86	1,0	1,07	1,14	1,21	1,29	1,11	0,93	0,86	0,28
	Вавуни	Макаренко	0,93	0,97	0,96	0,99	1,02	1,04	1,07	1,08	1,03	0,99	0,97	0,89	1,66
		Джорджно	0,95	0,99	0,99	0,99	1,01	1,03	1,04	1,06	1,05	1,01	0,99	0,90	1,63
	Алард	Макаренко	0,93	0,9	0,93	1,03	1,06	1,1	1,12	1,15	1,04	0,97	0,90	0,88	3,92
		Джорджно	1,0	1,0	1,0	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	0,99	0,97	0,95	3,63
	Амберд-устье	Макаренко	0,50	0,50	0,41	0,53	1,38	1,62	1,71	1,5	1,41	1,0	0,71	0,79	0,31
		Джорджно	0,53	0,71	0,84	0,87	1,18	1,27	1,40	1,55	1,70	0,71	0,71	0,56	0,32
	Ишард-устье	Макаренко	1,0	1,0	1,0	1,0	1,02	1,01	1,01	1,03	1,01	1,0	1,0	1,0	0,97
		Джорджно	0,92	0,91	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	0,92	0,96	1,05
	Касак-устье	Макаренко	0,85	0,92	0,96	1,0	1,04	1,04	1,13	1,15	1,13	0,99	0,91	0,89	5,23
		Джорджно	0,96	0,98	1,0	1,0	1,01	1,02	1,05	1,05	1,07	0,99	0,95	0,93	4,99

шения в период весеннего половодья. Близкие с последним методом величины подземного стока получаются в результате применения гидрохимического метода, подробно изложенного в [4].

ИВП АН Армянской ССР

Поступило 27.IX.1962

Ն. Ա. ՄԱԽՃԱՅԱՆ

ԱՐԱՎԱԿԱՆ ԸՆԴԱՊԱՆՈՒՄԻ ԳԵՏԵՐԻ ՄՏԱՐԵՐԿՐԱՆ ՀՈՍՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա. Վ. Փ. Ո. Փ. Ա. Մ.

Հայաստանի համար, որը ջրի սուր պակասություն ունի, ջրային ռեսուրսների ռադիոնուկլոգիայի ուղղորդման տեսակետից մոդերնիզացիայի անհրաժեշտ պահանջների պլանային տառադրման կարևորությունը խնդիր է հանդիսանում Այդ նկատառումով մեծ նշանակություն ունի գետային ավազանների և ջրհանների ջրային բաղադրիչ հետազոտությունը:

Ջրային բաղադրիչ բաղադրիչ տարրերից մեկը ստորերկրյա հոսքն է, որն իր հերթին գումարվում է վաղընթաց և վերընթաց ակունքների հոսքերից, ինչպես նաև մթնոլորտային տեղումներից ֆիլտրված ջրերից:

Հայաստանի լեռնային գետերը ստորերկրյա հոսքի մեծ ծավալ ունեն հրապարակական հաշվին, որոնք բացվում են ինչպես գետերի ավազաններում, այնպես էլ նրանց հոսքերում:

Հողածածկ շենքերից էլ Մ. Ա. Մարտիրոսյան և Ջ. Վ. Ջորջիայի կողմից մշակված ստորերկրյա հոսքի անջատման եղանակները և հանձնարարվում է Արագածի լեռնազանգվածի գետերի համար կիրառել տառադրման եղանակը:

Կատարված հաշվումները վերոհիշյալ լեռնազանգվածի գետերի (Քասախ, Դեղարտա, Եղեղիք և Ամբերա վտակներով, Կարանգու, Դառնակա, Սելավ, Բառաբալի և Թալինի ակունքների) համար զույգ տվյալներ, որ գետի ընդհանուր հոսքի Q_{Σ} ստորերկրյա հոսք է և նրա տարեկան ծավալը կազմում է 197 մլն մ^3 :

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Макаренко Ф. А. Некоторые результаты изучения подземного стока. Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, т. 1. 1948.
2. Джорджано Э. В. Межень на реках Средней Азии. Тр. ТГО, кн. 15 (16). 1957.
3. Важняв А. И. О подземном питании горных рек в период половодья и летней межени. Труды ИГиЛ, 1959.
4. Махджян М. А. О гидрохимическом методе определения подземного стока для рек с родниковым питанием. Известия АН Армянской ССР, серия ТН, №6, 1962.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

А. А. РОТИНКИН

К РАСЧЕТУ МОНТАЖНЫХ УСИЛИЙ В ПУЧКАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

При изготовлении железобетонных предварительно напряженных пролетных строений в подвижных металлических стендах арматурные пучки натягиваются до бетонирования конструкции и усилие натяжения передается на стенд. В процессе натяжения пучки металлической конструкции стенда испытывают сжатие, которое вызывает соответствующее укорочение продольных балок стенда, а также прогиб поперечных балок, диафрагм и закладных деталей. В предлагаемой автором методике расчета монтажных усилий в арматурных пучках, вводится приведенная жесткость стенда с учетом прогиба поперечных балок, диафрагм и закладных деталей.

Определим приведенную жесткость стенда при натяжении пуч-

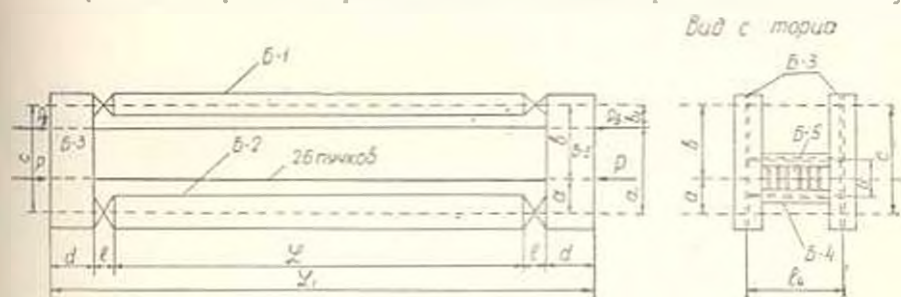


Рис. 1. Схема металлического стенда. Б-1 — балка верхней распорки; Б-2 — балка нижней распорки; Б-3 — опорная балка; Б-4 — диафрагма; Б-5 — закладные детали; Р — усилие натяжения нижних арматурных пучков балки, Р₀ — усилие натяжения пучков в плите балки.

ков в нижнем поясе балки. Обозначая через Р силу натяжения, получим следующие выражения для укорочения верхней балки (рис. 1):

$$\Delta_b = \frac{P \cdot a \cdot L}{E \cdot E \cdot F_1} \quad (1)$$

и укорочения нижней балки

$$\Delta_a = \frac{P \cdot b \cdot L}{E \cdot E \cdot F_1} \quad (2)$$

Здесь E — модуль упругости балок; F_1 — площадь сечения балки Б-1; F_2 — площадь сечения балки Б-2.

Перемещение недеформированной балки Б-3, на уровне — центра тяжести арматурных пучков нижнего пояса от укорочения балок Б-1 и Б-2 будет равно (рис. 1):

$$\Delta_1 = \Delta_2 + (\Delta_3 - \Delta_2) \frac{b}{c} \quad (3)$$

Обозначая через f_2 — суммарный прогиб двух балок Б-3, f_4 — суммарный прогиб двух диафрагм Б-4, f_5 — суммарный прогиб закладных деталей Б-5 с двух концов стенда, получим следующее выражение для определения суммарного перемещения концов арматурных пучков (рис. 1):

$$\Delta_1 = \Delta_2 + \frac{2P}{3EJ_2} \cdot \frac{a^2 b^2}{c} + \frac{PL_4}{24EJ_4} + \frac{PL_5}{24EJ_5} \quad (4)$$

Здесь l_2 , l_4 , l_5 — длины, а J_2 , J_4 , J_5 — моменты инерции сечения соответственно балок Б-3, Б-4 и Б-5.

Приведенная жесткость стенда может быть найдена из выражения:

$$E_{\text{пр}} (F_1 + F_2) = \frac{PL}{\Delta_1} \quad (5)$$

откуда приведенный модуль деформации стенда:

$$E_{\text{пр}} = \frac{PL}{\Delta_1 (F_1 + F_2)} \quad (6)$$

Аналогично, при натяжении пучков в плите балки усилием P_b (рис. 1) получим следующие выражения для определения суммарного перемещения концов арматурных пучков в поясе балки:

$$\Delta_1 = \left[\frac{b_1 L}{c E F_2} + \left(\frac{a_1}{F_2} - \frac{b_1}{F_2} \right) \frac{L}{c E} \cdot \frac{a_1}{c} + \frac{2}{3 E J_2} \cdot \frac{a_1^2 \cdot b_1^2}{c} + \frac{l_1^2}{24 E J_6} \right] P_b + f, \quad (7)$$

где прогиб балок у нижних пучков

$$f = 1 - \frac{P_b \cdot b_1 \cdot a}{3 E J_2 c} \cdot (c^2 - a^2 - b^2)$$

Приведенная жесткость стенда для расчета потерь усилий в нижних пучках при натяжении верхних

$$F_{\text{пр}} (F_1 + F_2) = \frac{P_b \cdot L}{\Delta_{\text{н}}} \quad (8)$$

Соответственно приведенный модуль деформации стенда будет равен

$$E_{\text{пр}} = \frac{P_b \cdot L}{\Delta_{\text{н}} (F_1 + F_2)} \quad (9)$$

Величины расчетных усилий Z , с которыми должны быть натянуты арматурные пучки, определяются из расчета прочности предварительно напряженной конструкции. Силы монтажного натяжения V не всегда равны расчетным. Необходимо определить монтажные усилия, которые бы обеспечили в итоге заданные расчетные натяжения. В связи с тем, что арматурные пучки натягиваются последовательно в определенном порядке, например, как показано на рис. 2, усилия в ранее натянутых пучках будут, очевидно, изменяться последующим натяжением остальных пучков и, следовательно, для получения в

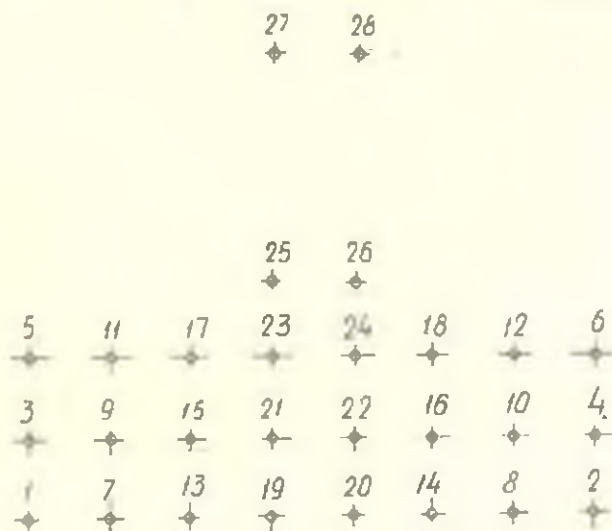


Рис. 2. Последовательность натяжения арматурных пучков.

конструкции расчетных усилий Z отдельные пучки должны натягиваться неодинаково. При натяжении i -го пучка силой V во всех ранее натянутых $i-1$ пучках возникнут потери усилий X_i , величины которых определяются из равенства деформаций стержня и пучков. Если обозначить через E_a модуль упругости, а через F_a площадь сечения арматурного пучка, то можем написать

$$V - X_i = X_i \frac{E_a (F_1 + F_2)}{E_a F_a (i-1)},$$

откуда

$$X_i = V \frac{(i-1)}{(i-1) + \beta}, \quad (10)$$

где

$$\beta = \frac{E_a (F_1 + F_2)}{E_a F_a}.$$

Начальное усилие в каждом пучке уменьшится на величину

$$\Delta X_i = \frac{X_i}{i-1} = V \cdot \frac{1}{(i-1) + \beta}. \quad (11)$$

Если окончательное натяжение всех нижних пучков должно быть Z , то

$$V_1 - V_2 \frac{1}{1+\beta} - V_2 \frac{1}{2+\beta} - \dots - V_{11} \frac{1}{10+\beta} - V_{12} \frac{1}{11+\beta} = Z,$$

$$V_2 - V_3 \frac{1}{2+\beta} - V_3 \frac{1}{3+\beta} - \dots - V_{11} \frac{1}{10+\beta} - V_{12} \frac{1}{11+\beta} = Z$$

.....

$$V_{11} - V_{12} \frac{1}{11+\beta} = Z; \quad V_{12} = Z;$$

Отсюда

$$V_i = V_{i+1} \left(1 + \frac{1}{i+\beta} \right). \quad (12)$$

где V_{i+1} сила монтажного натяжения последующего арматурного пучка.

Монтажное усилие в каждом пучке i -ой группы определяется по формуле

$$Z_i = \frac{V_i + \Delta X_i}{2}. \quad (13)$$

Пример расчета. Исходные данные: расчетный пролет предварительно напряженного пролетного строения моста $l_p = 33,5$ м; длина балок стенда $L = 34,20$ м; длина арматурных пучков $L_1 = 37,80$ м; состав арматурного пучка—24 ф 5; число пучков в нижнем поясе—26 в плите—2; площадь сечения верхней балки стенда $F_1 = 420$ см²; площадь сечения нижней балки стенда $F_2 = 968$ см²; модуль упругости материала балок (сталь марки СТ. 3) $E = 2,1 \cdot 10^8$ кг/см²; Модуль упругости арматурных пучков $E_a = 1,8 \cdot 10^8$ кг/см²; Размеры металлического стенда: $a = 97$ см; $b = 263$ см; $c = 360$ см; $a_1 = 310$ см, $b_1 = 50$ см, $l_3 = 66$ см, $l_4 = 126$ см.

Армирование сечения производится согласно рис. 2. Напряжение арматуры производится силой $P = 1000$ т. При заданных величинах по формулам (3) и (4) находим суммарное перемещение концов арматурных пучков;

$$\Delta_1 = 1,18 + 0,18 + 0,026 + 0,008 = 1,39 \text{ см.}$$

Приведенная жесткость стенда согласно формуле (5)

$$E_{\text{пр}}(F_1 + F_2) = 2,45 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

Приведенный модуль упругости по формуле (6)

$$E_{\text{лр}} = 1,77 \cdot 10^8.$$

При натяжении пучков в плите балки усилием $P_0 = 100$ т. суммарное перемещение концов арматурных пучков в поясе балки согласно (7)

$$\Delta_{11} = 0,115 \text{ см.}$$

Приведенная жесткость стенда для расчета потерь усилий в нижних пучках, при натяжении верхних, согласно (8).

$$E_{\text{нпр}}(F_1 + F_2) = 2,98 \cdot 10^6 \text{ кг.}$$

Приведенный модуль упругости стелла согласно формуле (9)

$$E_{\text{нпр}} = 2,05 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2.$$

В связи с тем, что характер деформаций при натяжении нижних и верхних пучков различный, приведенный модуль упругости стелла необходимо определить отдельно.

Определим потери усилий в нижних пучках при их натяжении

$$\eta = \frac{E_s(F_1 + F_2)}{E_s \cdot F_s} = 144,5;$$

$$F_n = 25\phi 5 = 9,42 \text{ см}^2.$$

Монтажные усилия Z_i в каждом пучке арматуры i -ой группы, вычисленные по формуле (13), сведены в табл. 1.

Таблица 1

Определение величин монтажных усилий в арматурных пучках

Номера групп пучков (i)	Номера пучков в группе	$i + j$	$1 + \frac{1}{i+j}$	$V_i = V_{i+1} \left(1 + \frac{1}{i+j} \right)$ (m)	$Z_i = \frac{V_i + \Delta X_{i+1}}{2}$ (m)
1	1+2	145,5	1,00687	107,166	54,0
2	3+4	146,5	1,00683	106,435	53,5
3	5+6	147,5	1,00678	105,713	53,0
4	7+8	148,5	1,00673	105,001	53,0
5	9+10	149,5	1,00669	104,299	52,5
6	11+12	150,5	1,00664	103,605	52,0
7	13+14	151,5	1,00660	102,922	51,5
8	15+16	152,5	1,00656	102,247	51,5
9	17+18	153,5	1,00651	101,581	51,0
10	19+20	154,5	1,00647	100,924	50,5
11	21+22	155,5	1,00643	100,275	50,5
12	23+24	156,5	1,00639	99,634	50,0
13	25+26			2 \times 49,5 = 99	50,0
14	27+28			99,0	49,5

Определим потери усилий в нижних пучках при натяжении верхних. Оба верхних пучка во избежание несимметричного обжатия стелла и уменьшения монтажных усилий в верхних пучках натягиваются одновременно силами по 49,5 т. Следовательно,

$$V = 99 \text{ т; } \eta_2 = \frac{E_s(F_1 + F_2)}{E_s \cdot F_s} = 176.$$

Потеря усилия в каждой группе нижних пучков определяется по формуле (11)

$$\Delta X_{14} = \frac{99}{13 + 176} = 0,522 \text{ т,}$$

где индекс 14 означает, что в балке имеется 14 групп пучков. Учитывая потери усилий в нижних пучках при натяжении верхних, величину максимального монтажного усилия Z_i (табл. 1) следует увеличить на 0,5 т и оно будет равно 54,5 т. Приведенный расчет пока-

зывает, что величина потери напряжений в арматурных пучках при их натяжении в данном примере достигает 10% от расчетного и пренебрегать этим не следует, так как арматурные пучки окажутся недонапряженными.

РИИЖТ

Поступило 18.VII.1964

Ա. Ա. ՌՈՏԻՆՅԱՆ

ՆԱԽԱԳԱՀԱՐԱՐ ԵՐ ԿԱԹՈՒԵՏՈՆԵ ԿԱՌՈՐԸՆԵՐԻ ՀՆՆԱՄԵՋԱՅԻՆ
ԿԱՌՈՐՅԱԾՔՆԵՐԻ ԱՐԲԱՆԱՅԻՆ ՓԵՋԵՐՈՒՄ ՄՈՆԻՏՈՅԻՆ ՃԻՂԵՐԻ
ՀԱՇՎԱՐԿՈՒՄՆ ՇՈՒՂՐ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. լ. մ.

Շարժական մետաղական ստենդներում նախադրված երկաթբետոնե հենամեջալին կառուցվածքների պատրաստելիս ամրանալին փնջերը ձգվում են նախքան կոնստրուկցիայի բետոնումը և ձգման ճիգը փոխանցվում է ստենդին: Ամրանալին փնջերը ձգելիս ստենդի կոնստրուկցիաները ենթարկվում են դեֆորմացիայի: Ամրանալին փնջերում մոնտաժալին ճիգերի հաշվարկման համար հեղինակի կողմից առաջարկվող մեթոդիկայում ստացվում է ստենդի բերված կոռուկցիոնը՝ հաշվի առնելով լայնական հեծանների, ղիաֆրազմաների և միջադիր մասերի ձկվածքները:

А. Г. АЗИЗЯН, Н. И. СМЕРНОВ

ГИДРОДИНАМИКА БАРБОТАЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

С о о б щ е н и е 3

Проверка расчетных уравнений гидродинамики барботажных реакторов

Ранее нами, совместно с Р. А. Меликяном, предложены уравнения [1], позволяющие рассчитывать высоту газожидкостного столба, скорость всплывания и время контакта между газом и жидкостью для двух гидродинамических режимов: барботажного, или режима свободного всплывания пузырьков газа, и смешанного, при котором наряду со свободным всплыванием пузырьков имеет место также образование газовых струй [2]. До настоящего времени при расчете гидродинамики аппаратов барботажного типа, применяемых в химической промышленности, используются эмпирические уравнения [3—7], как например $H = (1,4 \div 1,6) h$, где h — начальная высота слоя жидкости (до барботажа); H — высота слоя газожидкостной смеси при барботаже. Это уравнение, как и ряд других, дают лишь приближенные значения гидродинамических величин, причем в отдельных случаях значения, полученные таким путем, весьма далеки от истинных. Это объясняется тем, что вывод уравнений базируется на частных опытах, вследствие чего они не учитывают влияния конструкции аппарата и физико-химических свойств участвующих в процессе веществ, тогда как этими факторами в значительной степени обусловлена гидродинамика процесса барботажа.

Как уже отмечалось, выведенные нами уравнения применимы для двух различных гидродинамических режимов всплывания газа через слой жидкости. Поэтому прежде всего необходимо определить наличие того или иного режима, для применения соответствующего уравнения. При помощи уравнения перехода возможно определить область действующего гидродинамического режима

$$(W_{см})_{крит.} = \frac{1,4 \pi d_0^{2,5}}{D^2} \cdot \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{0,5} \quad (1)$$

где $(W_{см})_{крит.}$ — скорость газа в полном сечении аппарата в условиях перехода от барботажа к смешанному барботажно-струйному режиму в м/сек;

d_0 — диаметр отверстий или барботёров;

n — число барботёров;

D — внутренний диаметр аппарата в м;

γ_l — удельный вес жидкости в кг/м^3 ;

γ_b — удельный вес газа в кг/м^3 .

Если заданная скорость газа в полном сечении аппарата $W_{\text{ср}}$ менее рассчитанного по уравнению (1) критического значения, то имеет место барботажный режим, в противном случае — смешанный барботажно-струйный режим. Выведенные в [1] уравнения, после некоторого уточнения можно представить в следующем виде. Для барботажного режима

$$(W_{\text{ср}})_{\text{кр}} = \left(\frac{h^{1,25} D^{0,85}}{b d_0^{0,95} n^{0,85} W_d^{0,8}} - 1 \right) \cdot W_{\text{ср}} \quad (2)$$

$$H = \frac{h^{1,25} D^{0,55}}{h^{0,25} D^{0,95} - b d_0^{0,95} n^{0,85} W_d^{0,8}} \quad (3)$$

Для смешанного барботажно-струйного режима:

$$(W_{\text{ср}})_{\text{кр}} = \left(\frac{h^{1,25} D^{0,85}}{c d_0^{1,13} n^{0,85} W_d^{0,88}} - 1 \right) W_{\text{ср}} \quad (2a)$$

$$H = \frac{h^{1,25} D^{0,85}}{h^{0,25} D^{0,95} - c d_0^{1,13} n^{0,85} W_d^{0,88}} \quad (3a)$$

где $(W_{\text{ср}})_{\text{кр}}$ — средняя по высоте скорость всплывания газа в м/сек ;

W_d — скорость истечения газа в жидкость в м/сек ;

b и c — постоянные для данной пары жидкость-газ, причем

$$b = \frac{2,1 \gamma_l^{0,1} \sigma^{0,45}}{\gamma_c^{0,35} g^{0,15} \nu^{0,1}}; \quad (4)$$

$$c = \frac{3,83 \mu_c^{0,11} \sigma^{0,25}}{\gamma_c^{0,35} g^{0,15} \nu^{0,1}} \quad (4a)$$

где μ_c — вязкость жидкости в кг/м.сек .

σ — поверхностное натяжение на границе фаз в $\text{кг.сек}^2/\text{м}^2$,

g — ускорение силы тяжести в м/сек^2 .

Проверка вышеприведенных расчетных уравнений произведена на пяти видах барботажных реакторов, применяемых в настоящее время или ранее применявшихся на одном заводе органического синтеза. Принцип работы и конструкция всех видов реакторов аналогичны, и они отличаются друг от друга лишь размерами и количеством барботёров. Реактор представляет полый вертикальный цилиндрический аппарат, в который на определенную высоту h заливается жидкий катализатор (рис. 1, I) и через его слой пропускается реагирующий газ.

Небольшая часть газа вступает в реакцию, образуя целевой продукт и ряд побочных, которые вместе с непрореагировавшим газом удаляются сверху. При барботаже газа через катализатор, уровень последнего доходит до высоты H (рис. 1, II), причем отдельные брызги катализатора попадают на стенки реактора выше уровня II и, стекая обратно, оставляют на стенках смолистые вещества, которые, на-

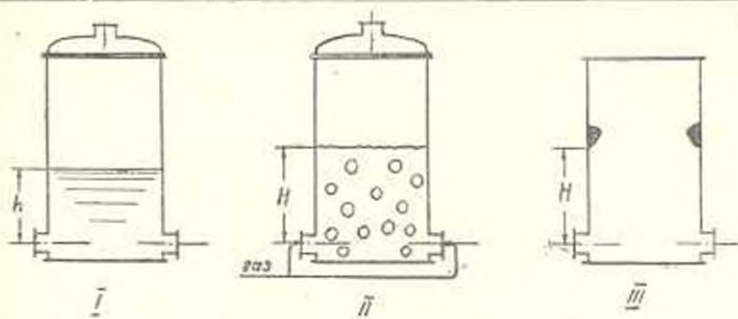


Рис. 1.

напливаясь в течении продолжительной работы, образуют значительные наслоения, так называемый „купол“. При вскрытии резктора во время ремонта достаточно измерить высоту нижней кромки „купола“ (рис. 1. III), чтоб получить представление о высоте газожидкостного столба H .

Таким образом, представлялось возможным проверить уравнения для расчета величины H , а так как все вышеприведенные уравнения выведены на основании одних и тех же экспериментальных данных [1, 2], то это подтвердит также правильность уравнений для средней скорости всплывания $(W_s)_{cp}$ и времени контакта газа с жидкостью

$$\tau = \frac{h}{(W_s)_{cp}} \quad (5)$$

Характеристики исследуемых реакторов, а также данные расчетов и замеров приводятся в табл. 1. Прежде всего определяем по уравнению (1) критическую скорость $(W_{ср})_{кр.}$, которая во всех случаях больше $W_{ср}$ и, следовательно, имеет место барботажный режим, т. е. используются уравнения (2), (3), (4). Приняв $\gamma_c = 1500 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_b = 1.2 \text{ кг/м}^3$, $\mu_c = 2.4 \text{ сП}$, (сантипуаз) $z = 50 \text{ дюйм/см}$ нетрудно согласно (4) вычислить постоянную $b = 0.1$. Подставив значения b и других параметров в уравнения (2), (3), (5) получим расчетные величины для высоты газожидкостного столба H , средней скорости всплывания газа $(W_s)_{cp}$ и времени контакта между газом и жидкостью.

Замеры действительной высоты газожидкостного столба H_d с целью проверки расчетных уравнений произведены в течении 1961—1963 годов описанным способом. Результаты этих замеров, представленные в табл. 1, показывают, что они хорошо совпадают с расчетной величиной H . Это подтверждает правильность уравнений (1), (2), (3), (4).

Данные табл. 1 подтверждают также известное положение о влиянии времени контакта на степень конверсии газа [8]. Так, если сравним данные граф 5 и 6 табл. 1, то нетрудно видеть, что при работе большого реактора с одним барботером за счет увеличения средней скорости всплывания от 1,15 до 1,85 м/сек время контакта сократилось с 3,48 до 2,16 сек. Как и следовало ожидать, это повлекло за собой уменьшение конверсии газа. И действительно, при работе большого реактора с одним барботером в ноябре-декабре 1962 г. произведенные анализы газа из реакторов с $n = 6$ и $n = 1$, показали, что во вто-

Таблица 2

Наименование параметров	Малый реактор	средний реактор	Большой реактор		
			$n=4$	$n=6$	$n=1$
Внутренний диаметр D м	1,45	1,95	2,95	2,95	2,95
Количество подаваемого газа Q_0 , м ³ /час	1400	3200	7000	7000	7000
Число барботеров n	1	3	4	6	1
Диаметр барботеров d_0 м	0,14	0,20	0,20	0,18	0,29
Начальная высота слоя жидкости h м	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Скорость газа в полном сечении аппарата $W_{га} = \frac{4Q}{\pi D^2}$ м/сек	0,222	0,279	0,266	0,266	0,266
Скорость истечения газа W_d м/сек	23,6	8,8	14,5	11,9	27,6
Критическая скорость газа в полном сечении аппарата $(W_{см})_{кр}$ по уравнению (1) м/сек	1,74	6,94	4,05	4,28	2,36
Средняя скорость всплывания газа $(W_{гв})_{ср}$ по уравнению (2) м/сек	2,00	1,90	1,28	1,15	1,85
Время контакта по уравнению (5) (сек)	2,0	2,1	3,12	3,48	2,16
Высота газожидкостного столба $H_{гж}$ по уравнению (3) (м)	4,46	4,60	4,85	4,95	4,60
Действительная (замеренная) высота газожидкостного столба H_z (м)	4,5—4,7	4,7—4,8	4,8—5,0	5,0	4,8

ром случае конверсия реагирующего газа уменьшилась с 15,5% до 12,5%, причем выход целевого продукта возрос с 79,6% до 82,0%.

Предположим, что на большом реакторе установлена распределительная сетка с отверстиями $d_0 = 0,05$ м, $n = 631$, что логично и геометрически возможно. В этом случае при прочих неизменных условиях (D , Q_0 , h) получим $W_d = 1,16$ м/сек, $H_{гж} = 8,8$ м, $(W_{гв})_{ср} = 0,244$ м/сек, $\tau = 17,8$ сек. Как видим, средняя скорость всплывания значительно уменьшилась, что можно приписать образованию мелких пузырьков (из маленьких отверстий), всплывающих с небольшой скоростью [9—11], а увеличение времени контакта ведет к увеличению выхода побочных высокомолекулярных продуктов [8]—смола, забивающих отверстия распределительной сетки. И действительно, при попытке установить в реакторах распределительные сетки, последние быстро выходили из строя вследствие забивки отверстий.

С помощью выведенных уравнений возможно обрабатывать экспериментальные данные других авторов. Так Аксельрод и Дильман [12] при проведении опытов с газожидкостными эмульсиями в системе вода-воздух в одном из опытов при барботажном режиме имели:

$$d_0 = 0,001 \text{ м}, n = 37, D = 0,03 \text{ м}, h = 0,02 \text{ м}, W_{га} = 0,015 \text{ м/сек},$$

$$\frac{\gamma_{смеси}}{\gamma_{жидкость}} = 0,93.$$

По выведенным нами уравнениям $W_d = 2,6$ м/сек, $(W_{гв})_{ср} = 0,0778$ м/сек (следовательно имеет место барботаж, так как

$(W_{cm})_{кр} > W_{cm}$, $H_{расч.} = 0,025$ м, $(W_s)_{ср} = 0,054$ м/сек, $\tau = 0,37$ сек. В этом случае

$$\frac{h}{H_p} = \frac{\gamma_{cm}}{\gamma_{жид.}} = 0,78.$$

Как видим, вычисленная величина $\gamma_{cm}/\gamma_{жид.}$ отличается от полученной авторами на 15%, что может быть объяснено небольшой величиной h и, вследствие этого, возможностью ошибки при замере. Ван-Кревелен и Гофтизер [11] производили опыты, при которых газ барботировал через жидкость в сравнительно небольших стеклянных колоннах.

Из работы упомянутых авторов нами обработаны результаты нескольких опытов, выбранных так, чтобы охватить различные значения d_0 , D и H . Во всех опытах воздух барботировал через воду, число отверстий $n=1$, режим барботажный. Данные авторов и результаты расчетов по уравнениям (3) и (4) приводятся в табл. 2, из которой видно, что расчетная величина H_p совпадает с действительной H_d .

Таблица 2

№ опытов	D м	h м	d_0 м	W_{cm} м/сек	W_d м/сек	$H_{дейст.}$ м	$H_{расч.}$ м
73	0,077	0,666	0,0023	0,0057	6,35	0,68	0,678
80	0,026	0,266	0,0023	0,0171	2,18	0,29	0,274
83	0,038	1,411	0,0023	0,0144	3,81	1,49	1,450
163	0,051	0,497	0,0012	0,053	9,60	0,51	0,508
164	0,051	0,469	0,0012	0,0262	47,10	0,51	0,512
176	0,051	0,499	0,00055	0,0019	42,00	0,51	0,514
178	0,051	0,476	0,00055	0,0187	160,0	0,51	0,530
244	0,051	0,400	0,0018	0,1250	103,0	0,51	0,523

Выведенные нами уравнения возможно применять к ситчатым тарелкам ректификационных, абсорбционных и др. колонн, где имеет место барботаж газа через слой жидкости. Например, для ситчатой тарелки колонны ректификации бензола $D=1$ м, $d_0=0,002$ м, шаг $s=0,04$ м, $n=1750$, $h=0,01$ м, $W_{cm}=0,1$ м/сек, $\gamma_c=800$ кг/м³, $\gamma_b=2$ кг/м³, $\mu_c=0,7$ сп, $\nu=29,4$ дин/см получим $W_d=14,3$ м/сек, $(W_{cm})_{кр}=0,089$ м/сек. Так как $(W_{cm})_{кр} < W_{cm}$ имеет место смешанный барботажно-струйный режим. Применяя уравнения (2а), (3а), (4а), (5) получим $H_{расч.}=0,0227$ м, $(W_s)_{ср}=0,08$ м/сек, $\tau=0,125$ сек, что весьма вероятно в колоннах подобного типа.

Резюмируя сказанное, можно отметить, что выведенные нами уравнения применимы при расчете и конструировании барботажных реакторов. С помощью этих уравнений можно подсчитать время контакта между газом и жидкостью, а также рабочий уровень жидкости в барботажных реакторах. Кроме того, приведенные уравнения могут быть применены и для других барботажных процессов, например, в тарельчатых ректификационных, абсорбционных и др. колоннах.

Авторы выражают благодарность Р. А. Меликяну за ценные советы, данные им в процессе выполнения работы.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 4.VI 1964

Ա. Շ. ԱԶԻԶՅԱՆ, Ն. Ն. ՍՄԻՐՆՈՎ

(Հաղագհում 3)

ՔԱՐԲՈՏԱԿԱՅԻՆ ՊՐՈՏԵԻՆՆԵՐԻ ՀԻԴՐՈԳԵՆԱՄԵՐԻԱՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հաղիվածում արվում է ճշտված և զործնական հաշվումների համար հարմարեցրած ալին կրիտիկալ հափասարումները, որոնք զուրա են լինել նախորդ հաղորդումներում: Հաղիված հափասարումները ստուգված են հինգ տեսակի արտադրական բարրատառալին սեփաորենիում զործնական պալմաններում, և ըստ դեպքերում ստացված զործնական շափումները համընկել են հափասարումների հիման վրա հաղիված մեծաթվումների հետ: Հաղիված բանաձևերի հիման վրա արած հզրակացութունները միանգամալն համընկնում են տվյալ բնագավառում զոլումթուն ունեցող տեսական և պրակտիկ հալացումների հետ:

Դուրս բերած հափասարումների հիման վրա մշտված են ալ հեղինակների կողմից ստացված նման փորձնական ավալների և սալացություն է, որ նրանք միանգամալն բալարոր կերպով ճշգրակվում են վերահիշյալ հափասարումներին: Բացի ալլ ցույց է տրված, թե ինչպես կարելի է զուրա բերած հափասարումները սղապարծել ավանավոր աշտարակների հաղիվումների դեպքում:

Եզրակացութուն է արված, որ նախորդ հաղորդումներում զուրա բերված հաղիված հափասարումները պիտանի են բարրատառալին ապարատների մեջ հեղուկի աշխատանքալին մախարզածը, զաղի և հեղուկի կոնտակտի տեսլալվումը և ալլ մեծաթվումներ հաղիկու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. Г. Азизян, Р. А. Меликян, Н. Н. Смирнов, «Изв. АН Армянской ССР», серия ТН, т. XIV, 2, 1961.
2. А. Г. Азизян, Р. А. Меликян, Н. Н. Смирнов, «Изв. АН Армянской ССР», серия ТН, XIV, 3, 1961.
3. А. Г. Касаткин, Процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, 1960.
4. В. Г. Левич, Финансо-химическая термодинамика, 1959.
5. В. Г. Бигдасаров, Теория, расчет и практика эргазифта, 1947.
6. Я. Циборовский, Процессы химической технологии, Госхимиздат, 1959.
7. А. Н. Плиновский, В. М. Ралин, С. Э. Коган, Процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, 1962.
8. Н. Н. Смирнов, Синтетические каучуки, Госхимиздат, 1954.
9. L. Massimida, A. Solimondo, E. Squilace, ВСФ, 6, 4, 1961.
10. E. Coester, ZAP, 13, 5, 1961.
11. D. W. Van-Krevelen, P. J. Hoflijzer, «Chem Eng. Progr.», 46, 1, 1950.
12. А. С. Аксельрод, В. В. Дильман, Журн. «Химическая промышленность», № 1, 1954.

СОДЕРЖАНИЕ

XVII тома „Известий АН Армянской ССР“ (серия технических наук)

№—стр.

К введению международной системы единиц в СССР. 1—3

Гидравлика

Г. А. Макарян. К определению гидравлического показателя русла. 3—3

Энергетика

Г. Т. Адоиц. К теории и методам расчета многополюсника (сообщение 1) 5—3

Г. Т. Адоиц. К теории и методам расчета многополюсника (сообщение 2) 6—3

Г. А. Айрапетян. Некоторые вопросы несинхронных АПВ межсистемных электропередач объединенных энергосистем 1—17

Г. А. Айрапетян. Управление синхронного генератора с демпферными контурами для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах 6—17

Б. Я. Буниatian. Неустойчивый режим движения жидкости в реактивных гидротурбинах (сообщение 2) 5—19

Г. А. Бурмачян, С. М. Саркисян. Выбор оптимального режима работы насосно-аккумулирующей ГЭС в энергетической системе 4—53

Г. А. Бурмачян. К выбору наилучшего режима работы насосно-аккумулирующей гидроэлектростанции в энергетической системе 5—33

Э. Е. Вероян. К методике определения аккумулирующей способности конечного участка магистрального газопровода 2—3

К. А. Гамбурян. Моделирование нагрузок МСПТ с помощью аналоговой машины 1—31

Л. А. Дилиjian. Об одном принципе построения оптимального режима энергосистемы с дефицитом мощности 1—23

Г. Н. Кумисиashvili. Исследование устойчивости регулирования блоков тепловых электростанций в энергетических системах 2—21

М. Г. Мнацаканян. Передаточная функция трехфазного трансформатора тока с подмагничиванием с активной-индуктивной нагрузкой 2—11

Э. С. Позосбеков. К вопросу выравнивания многолетних колебаний гидроэнергии тепловыми электростанциями 4—61

Б. Б. Сифаров. Определение рационального времени регулирования поворотных лопастных гидротурбин на электронной цифровой вычислительной машине 5—25

А. Г. Торосян. К вопросу о применимости критериальных координат для обобщения данных потерь мощности на корону 5—9

Ю. М. Шахназарян. Электромагнитная мощность гидрогенератора в переходных режимах 1—11

Гидротехника

Г. А. Амбарцумян. Некоторые новые исследования по сквозным шпорам гидравлическим барьером 4—43

Я. Б. Бунияtian. Влияние больших воздушных включений на работу изпорных водоводов 4—27

Приборостроение

Д. О. Аветисян. Исследование частотных характеристик регуляторов на базе приборов прямого измерения 6—23

Гидрология

- Э. А. Атаян. Внутригодовое распределение стока рек бассейна верхнего течения р. Аракс 5—69
- И. В. Егиазаров. Влияние широкой смеси наносов и самоотмостки русла на движение и расход наносов (сообщение 1). 2—29
- И. В. Егиазаров. Влияние широкой смеси наносов и самоотмостки русла на движение и расход наносов (сообщение 2). 3—11
- И. А. Шахбазян. О гидрохимической методике определения подземного стока для рек с родниковым питанием 2—45
- И. А. Шахбазян. Определение подземного стока рек Арзаканского массива 6—41

Теплотехника

- Л. А. Агасян. Регулирование газотурбинной электростанции со свободно-поршневым генератором газа 5—43
- И. Г. Таранян. Исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучка оребренных алюминиевых цельнокатаных трубок 3—19
- И. Г. Таранян. Исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления поперечного обтекаемого круглого разрезного ребра 6—33

Сейсмостойкость сооружений

- Г. А. Командрина. О расчете зданий на сейсмические воздействия с учетом пространственной работы 4—17
- Э. Е. Хачиян. Расчет сооружений на сейсмостойкость с учетом упруго-пластических деформаций. 4—3

Инженерная сейсмология

- Э. Е. Хачиян. Расчет сооружений на сейсмостойкость по акселерограммам сильных землетрясений (сообщение 3). 4—41

Строительные конструкции

- Р. С. Аветисян. О потерях предварительного напряжения при прогреве железобетонных конструкций на стендах 3—25
- А. В. Акопян, В. А. Карапетян. Экспериментальное исследование жесткости туфожелезобетонных балок при длительном действии нагрузки 4—77
- В. И. Гусакова, К. О. Карамян. Исследование самозажерывания арматуры в предварительно напряженных силикато-бетонных балках 3—31
- Г. М. Канецян. Статическая и усталостная прочность струнбетонных балок (сообщение 3). 2—53
- Г. М. Канецян. Статическая и усталостная прочность струнбетонных балок (сообщение 4). 4—61
- А. А. Ротинянц. К расчету монтажных усилий в пучках железобетонных предварительно напряженных пролетных строений мостов 6—17
- С. Г. Шагинян. Исследование отсека многоэтажного крупноблочного жилого дома на молниях с применением сейсмозащитного устройства 5—51

Строительные материалы

- А. А. Аракелян. К вопросу определения прочности бетона 3—53
- А. О. Елоян. Прочность и деформации легких бетонов на вулканических заполнителях при многократной нагрузке (сообщение 1). 5—61
- С. Г. Овчаров. О биостойкости некоторых пленочных полимерных гидроизоляционных материалов 1—53
- Л. П. Папкова, Х. О. Геворкян, О. П. Мчедлов-Петросян. О вяжущих материалах некоторых древних сооружений Армении 2—61
- М. Э. Симонов. Новый прибор и методы для изучения свойств бетонной смеси 3—37

Химическая технология

- А. Г. Азизян, И. И. Смирнов. Гидродинамика барботажных процессов (сообщение 3) 6—53

Научные заметки

- И. Н. Юдин. К исследованию безразмерных характеристик гидромеханических передач 5—77
- Я. Ф. Гончаревич, Е. А. Симонян. Некоторые закономерности соударения груза с вибрирующей поверхностью 1—57
- Б. С. Гукасян. Вибрации, возникающие при работе токарного станка 2—73
- М. С. Минисбекян, Г. А. Султанян. Погрешности, связанные с теплопроводностью проводов термонпар 2—79
- А. Т. Оганесян. Прибор для измерения остаточного напряжения в электрических конденсаторах 4—83
- М. П. Спакин. Особенности износа резцов в зависимости от их свойств 2—67
- В. Г. Чалабов, Р. В. Малов. К вопросу снижения токсичности отработанных газов транспортных средств горнодобывающей промышленности 2—76

ՐԱՎ.Ա.Ն.Գ.Ա.Կ.ՈՒԹՅՈՒՆ

«Հայկական ՍՍՌ-ԿԼ. Տեղեկագրի» (տեխնիկական զիտուրյունների սերիա)
XVII հատորի

№ Էջ

ՍՍՌ-ում միավորների միջազգային սխառնիքի ընդունման վերաբերյալ 1—3

Հիպոթեզներ

Կ. Ա. Սակարյան. Հույնի հիպոթեզիկական ցուցիչն ուղղման մասին 3—3

Էներգետիկա

- Ն. Տ. Ազոնց. Բաղմարենականների հաշվման մեթոդի և տեսությունների վերաբերյալ (հաշվարկում 1) 3—3
- Ն. Տ. Ազոնց. Բաղմարենականների տեսություններ և հաշվման մեթոդները (հաշվարկում 2) 6—3
- Բ. Լ. Բունյաթյան. Հեղուկների շատատարած շարժման ուժի միջև ունեցած հեղուկության բարենեղում (հաշվարկում 2) 3—10
- Հ. Ա. Բուրնաչյան. Լ. Մ. Սարգսյան. Էներգետիկ սխառնումում աշխատող պոմպակոտակիչ հիդրոկոյանի սպտիմալ ուժի միջև ընտրությունը 1—53
- Հ. Ա. Բուրնաչյան. Էներգետիկ սխառնումում պոմպակոտակիչ հիդրոկոյանի ամենամեծ տեսակի ուժի միջև ընտրությունը զինամոխիական ծրարման և լարանակով 3—33
- Կ. Հ. Գալստյան. Փոփոխական հոսանքի ցանցի մոդելի բեռների մոդելացումը անսարք մեքենայի ողնու խլամբ 1—31
- Լ. Հ. Իլյանյան. Հզորությունների ցիֆերային էներգետիկական օպտիմալ ռեժիմի կառուցման մի սկզբունքի վերաբերյալ 1—23
- Ա. Ա. Թորոսյան. Պատկեր կոորդինատների բնդանաբանության համար կրիտերիայի կոորդինատային սխառնմանը օգտագործելու հարցի մասին 3—9
- Գ. Գ. Կուսմաշվիլ. Էներգետիկական սխառնմանի ցերմային էլեկտրականների կանոնադրման կայունություն հետադրությունները 3—21
- Դ. Ա. Հայրապետյան. Միադասի էներգետիկականների միջանոսականային էլեկտրահաղորդման գծերի ու օրենքայինային ուղի հարցեր 1—17
- Դ. Ա. Հայրապետյան. Պատկերային շրջագծերով սինխրոն գեներատորի հավասարումները՝ էներգետիկականների միջև էլեկտրամեխանիկական անցողիկ պոմպակոտակիչը հաշվարկում համար 0—17
- Դ. Գ. Սահակյան. Հոսանքի մաղնիսային աղտիվ-ինդուկտիվ բեռնվածքով եռաֆազ արանաֆորմատորի մոխանցման ֆունկցիան 2—11
- Յու. Մ. Շառնաղարյան. Հիդրոգեններատորի էլեկտրամագնիսական հզորությունները և անհամադրությունների դեպքում 1—11
- Է. Ա. Պողոսյան. Ջերմային էլեկտրականայինների միջոցով հիդրոէլեկտրականային բաղմամյա տատանումների համարակցման կարգի վերաբերյալ 4—61
- Բ. Կ. Սահարով. Պատմականորեն առարկաների կարգավորման օպերանայի մասնականամիջոցի բնաբում էլեկտրոնային խառնի հաշվիչ մեքենայի ողնու խլամբ 3—25
- Է. Ե. Վերդյան. Մագնետրայի դադարումի վերջնականամասի դադարումում տեսականությունները ուղղման և լարանակի վերաբերյալ 2—3

Հիպոթեզներ

Լ. Բ. Բունյաթյան. Օղակին մեծ պարունակությունների աղղեցու թյունը և անհամադրությունները հրատարակելու աշխատանքի վրա 4—27

Դ. Ա. Համարձոմյուն. Հիգդ-վիկի դիմապատմի միջանցիկ խթանի մի բանի նոր ուսումնասիրությունների մասին	4—23
---	------

Պորձյութաբնություն

Դ. Հ. Ավետիսյան. Անձիջական շափման սարքերի բազայի վրա պատրաստված կարգավորիչների համախառնությունը	0—23
---	------

Ֆինանսական կոնսուլցիաներ

Ռ. Ս. Ավետիսյան, Նախնական լարումների կոդուսները շոգենաբարությունից՝ առևն-դային եղանակով պատրաստվող կոնսուլցիաներում	2—35
Վ. Ն. Դուստկով, Ա. Հ. Փարսյան. Նախապես լարված սխիզատարներին հեծան-ներում ամրանի ինքնախառնման հետադրությունը	3—31
Հ. Ս. Կանեղյան. Լարարևտուն հեծանների ստատիկական և հոգնածային տարու-թյունը (հաղորդում 3)	2—53
Հ. Ս. Կանեղյան. Լարարևտուն հեծանների ստատիկական և հոգնածային ամրությունը (հաղորդում 4)	4—69
Հ. Վ. Նախյան, Վ. Ս. Կարապետյան. Փորձարկումների միջոցով երկաթուղի-բեռնակ հեծանների կոդուսի առումնասիրությունը բեռի երկարա-ն ու զ-դեցությունից	4—77
Ս. Կ. Շանիկյան. Իսղմանաբար խոշորարյուն բնակելի տան ուսումնասիրությունը մո-դելների վրա՝ պայմանային սեյսմիկ աղյուսության կիրառումով	5—51
Ա. Ա. Ռոտմիստով. Նախադրված երկաթուղիների կառուցման հեծանների կառու-թյունների ամրանային փնջերում մոնոտոմային հիմքի հաշվարկման շուրջը	6—47

Հիգրոլոգիա

Է. Ա. Արսյան. Արարի վերին հոսանքի աղիվանի գետերի հոսքի տարեմիջյան բաշխումը	5—69
Ի. Վ. Շվիդարով. Ջրաբերությունների լայն խառնուրդի և հոսքի ինքնաստիճանային աղիվանությունը ջրաբերությունների շարժման ու ծախսի վրա (հաղորդում 1)	2—29
Ի. Վ. Նիկոլայով. Ջրաբերությունների լայն խառնուրդի և հոսքի ինքնաստիճանային աղիվանությունը ջրաբերությունների շարժման ու ծախսի վրա (հաղորդում 2)	3—11
Շ. Ա. Մանուկյան. Աղբյուրներից սնվող գետերի առերեկոյա հոսքի որոշման հիգրո-ցիմիական և զանազակ վերաբերյալ	2—45
Շ. Ա. Մանուկյան. Արագածի լեռնաշղթայի գետերի ստատիկայի հոսքի որոշումը	6—41

Ջերմաստիճանիկա

Լ. Ա. Աղաբաբյան. Աղասի միջոցային շարժիչով դադարաբերության կետերի կարգավորումը	3—43
Ի. Դ. Քառանյան. Կոդուսով աշտմին և խոզովակներից բաղկացած փնջի վերամասնու-թյան և ալերոգրամիկական դիմադրությունը ուսումնասիրությունը	3—19
Ի. Գ. Քառանյան. Կարավածքով կտր կտրի վերամասնությունը և ալերոգրամիկական դիմադրությունը առումնասիրությունը օդի լայնական հոսքով շրջանակում	6—33

Կառուցվածքների ու կառուցվածքների

Է. Ա. Նախյան. Կառուցվածքների սեյսմակայունությունը հաշվարկի՝ առանձին-սյուստիկ դեֆորմացիաների հաշվառումով	8—3
Տ. Ա. Կոմարով. Շենքի ստորածակային աշխատանքի հաշվառումով սեյսմիկ աղի-նությունը հաշվարկի մասին	4—17

Ինժեներական սկզբնական

Է. Ա. Նախյան. Սկզբնական երկրաշարժների աղիվանությունների հիման վրա կառուցվածք-ների սկզբնականությունը հաշվարկի	1—41
--	------

Շինանյութեր

- Հ. Ա. Առաքելյան, Բնտնի ամրությունը որոշելու հարցի վերաբերյալ 3—33
- Ա. Հ. Եվդյան, Հրաբխային լցիչներով թեթև բետոնների ամրությունը և դեֆորմացիաները բաղադրիկ կրկնվող բեռների տակ (հաղորդում 1) 3—61
- Լ. Պ. Պապկովա, Խ. Հ. Գեորգյան, Օ. Պ. Մյնզլով—Պետրոսյան, Հայաստանի հիւսիս-արևմտյան կապակցող նյութերը 2—61
- Ո. Չ. Ուրմուշով, Բնտնի խառնուրդի հատկությունների ուսումնասիրման նոր սարք և նոր մեխոներ 3—37
- Ա. Գ. Օվչին, Բաղնիքային պոլիմերային հիդրոմեկուսիչ նյութերի կենսաբանական և նյութական հարցի վերաբերյալ 1—53

Քիմիական օբյեկտներ

- Ա. Հ. Արդյան, Ե. Լ. Ուրմուշով, Բարրությունային պրոցեսների հիդրոլիզմի կան (հաղորդում 3) 6—53

Գիտական նյութեր

- Ի. Ն. Արդյան, Հիդրոմեխանիկական փոխանցումների բնութագրերի հետազոտություն վերաբերյալ 3—77
- Ի. Յ. Կոնյարին, Ե. Ա. Ուրմուշով, Բնտնի և տատանվող մակերեսի փոխադարձ հարկման որոշ օրինաչափություններ 1—37
- Ա. Տ. Շալինսկիյան, Էլեկտրական կոնդենստորներում մնացորդային լարվածությունը չափելու սարք 4—53
- Ր. Ո. Լուկասյան, Խառնուրդի խառնուրդի աշխատանքի մասնակա առաջնություններ 2—73
- Ո. Ո. Ուրմուշովյան, Ղ. Հ. Սուրյանյան, Ջերմագույցի սխեմաներ՝ կախված նրա հաղորդականների քիմիական կազմից 2—79
- Վ. Գ. Չալաբով, Ի. Վ. Ուրմուշով, Հանքահանության մեթոդների արդյունաբերության տրանսպորտային մեխոնների արտադրած զանգերի թանաքորոշյալ պակասեցման հարցի վերաբերյալ 2—76
- Ո. Վ. Ուրմուշովյան, Կտրիչների մաշվածքի տառնանահանությունների կախված նրանց հատկություններից 2—67

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

62

ՀՅԵՐԳԵԱԿԱ

Հ. Տ. Աղոցց, Բագմաքենոսակի տեսութիւնը և հաշվման մեթոդները	3
Գ. Ա. Հայրասեկոյան, Դեմոկրատիայի շրջագծերով սինթրոն զննեցատորի հաշուարումները՝ էներգոսինթեզներում էլեկտրամեխանիկական անցողիկ պրոցեսները հաշվելու համար	17

ԳՈՐԾԻՄԱՇԻՆԱՍՅՈՒՆ

Դ. Հ. Ավետիսյան, Անմիջական չափման սարքերի բաղադրիչ բաղադրանքներով կարգավորելիքները հաշվարկանշութային բնութագրերի հետազոտումը	23
--	----

ՋԵՐՄԱՆԵՐԻԿԱ

Ի. Գ. Քառանյան, Կարտովածքով կլոր կողերի ջերմատվութային և աէրոդինամիկական դիմադրութային ուսումնասիրութիւնները օդի լայնական հոսքով շրջնաւիթ	33
---	----

ՀԻՊՐՈՍՊԻԱ

Շ. Ա. Շաճբազյան, Արագածի լեռնազանգվածի գետերի հոսքի որոշումը	41
--	----

ՇԻՄԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒՆԳԻԱՆԻՐ

Ա. Ա. Ռոտիսլյանց, Նախալարված երկաթբետոնե կամուրջների հեյմ էնկոյին կառուցվածքների ամրանային փնջնորում մոնտաժային ճիշդի հաշվարկման շուրջը	47
---	----

ՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱԵԽՆՈՂՈՎԻԱ

Ա. Հ. Սգիգյան և Ի. Սմիլնով, Բարբոտաժային պրոցեսների հիդրոդինամիկան (հաղորդում 3)	53
XVII հատորի բովանդակութիւն	59

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Энергетика

<i>Г. Т. Адоиц.</i> К теории и методам расчета многополюсника (сообщение 2). . .	3
<i>Г. А. Айрапетян.</i> Уравнения синхронного генератора с демпферными контурами для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах	17

Приборостроение

<i>Д. О. Аветисян.</i> Исследование частотных характеристик регуляторов на базе приборов прямого измерения	23
--	----

Теплотехника

<i>И. Г. Таракян.</i> Исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления поперечно обтекаемого круглого разрезного ребра	33
--	----

Гидрология

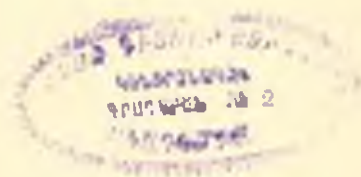
<i>Ш. А. Шахбазян.</i> Определение подземного стока рек Арагацского массива .	41
---	----

Строительные конструкции

<i>А. А. Ротинянц.</i> К расчету монтажных усилий в пучках железобетонных предварительно напряженных пролетных строений мостов.	47
---	----

Химическая технология

<i>А. Г. Азизян, Н. И. Смирнов.</i> Гидродинамика барботажных процессов (сообщение 3).	53
Содержание XVII тома	59



Сдано в производство 13/XI 1964 г. Подписано к печати 6/I 1965 г.

ВФ 06501 Заказ 437, изд 2515, тираж 550, объем 4.25 п. л.

Типография Издательства Академии наук Армянской ССР, Ереван, Барекамутян 24