

РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ОБМОТКИ ДОБАВОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Г. И. ФУКС, А. С. ЛЯЛИКОВ

1. Добавочное сопротивление находится в невентилируемом корпусе (рис. 1).

Сопротивление обмотки R ом, сила тока I а полная наружная поверхность добавочного сопротивления F_1 м², внутренняя и наружная поверхности корпуса F'_k и F''_k м², его толщина Δ_k м и коэффициент теплопроводности $\lambda_k \frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ известны.

Необходимо определить перегрев поверхности обмотки $\vartheta = t_1 - t_f$ °C при стационарном тепловом режиме прибора.

2. На основании общих положений теории теплообмена при стационарном тепловом режиме тепло, отдаваемое корпусом в окружающую

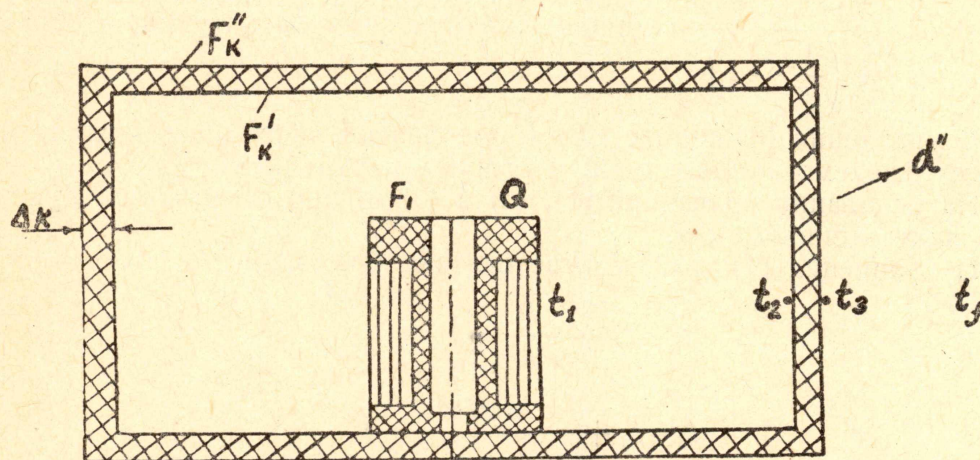


Рис. 1.

щую среду, передаваемое через стенку корпуса и поступающее от катушки на внутреннюю поверхность корпуса, одинаково. Это позволяет записать три уравнения:

$$P = \alpha'' (t_3 - t_f) F''_k, \text{ вт}, \quad (1)$$

$$P = \frac{\lambda_k}{\Delta_k} (t_2 - t_3) \frac{F'_k + F''_k}{2}, \text{ вт}, \quad (2)$$

$$P = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_1 - t_2) \sqrt{F_1 \cdot F'_k} + \varepsilon C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

или

$$P = (t_1 - t_2) \left(\frac{\lambda_3}{\delta_3} \sqrt{F_1 \cdot F'_k} + \varepsilon \cdot C_0 F_1 \Theta \right), \text{ вт.} \quad (3)$$

Обозначено:

$\alpha'' = \alpha_k + \alpha_l$ — суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением с поверхности корпуса, $\frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$;

t_2 и t_3 — температура внутренней и наружной поверхности корпуса, °C;

$$\Theta = \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2},$$

где

T_1 и T_2 — температуры t_1 и t_2 в абсолютной шкале, °K.

λ_3 — эквивалентный коэффициент теплопроводности прослойки воздуха между катушкой и корпусом (с учетом конвекции), $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$;

δ_3 — условная эквивалентная толщина воздушной прослойки между катушкой и корпусом, м;

$\sqrt{F_1 \cdot F'_k}$ — среднегеометрическая площадь эквивалентной воздушной прослойки, м²;

$C_0 = 5,7$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^4}$;

ε_1 и ε'' — степень черноты катушки и корпуса;

$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F'_k} \left(\frac{1}{\varepsilon''} - 1 \right)}$ — степень черноты системы катушка—корпус.

В уравнении (3) первое слагаемое правой части представляет тепло, передаваемое конвекцией, а второе — излучением.

На основании уравнений (1), (2) и (3) можно наметить следующий путь нахождения t_1 и δ .

Из уравнения (1) и (2) соответственно получаем

$$t_3 = t_f + \frac{P}{\alpha'' \cdot F'_k}, \quad (4)$$

$$t_2 = t_3 + \frac{2P}{\frac{\lambda_k}{\Delta_k} (F'_k + F''_k)}. \quad (5)$$

Найдя t_2 , следует воспользоваться уравнением (3) для определения t_1 . Предварительно необходимо вычислить δ'_3 и λ_3 .

А. Для определения δ_3 рассмотрим случай расположения одного тела внутри другого, когда форма обоих тел шаровая (рис. 2, а).

$$\delta_3 = \frac{D - d_2}{2}. \quad (a)$$

Объем воздуха между внутренним шаром и шаровой оболочкой

$$V = \frac{\pi}{6} (D^3 - d_2^3), \quad (6)$$

а сумма поверхностей F_1 и F'_K

$$F_1 + F'_K = \pi (D^2 + d_2^2). \quad (6)$$

Отношение (6) и (в) дает

$$\frac{V}{F_1 + F'_K} = \frac{1}{6} \frac{(D^3 - d_2^3)}{(D^2 + d_2^2)} = \frac{2}{6} \frac{D^2 + Dd_2 + d_2^2}{D^2 + d_2^2} \cdot \frac{D - d_2}{2}. \quad (2)$$

Из (2) можно записать

$$\begin{aligned} \delta_3 &= \frac{D - d_2}{2} = 3 \frac{D^2 + Dd_2 + d_2^2}{D^2 + Dd_2 + d_2^2} \cdot \frac{V}{F_1 + F'_K} = \\ &= K_\Phi \cdot \frac{V}{F_1 + F'_K}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$K_\Phi = 3 \frac{D^2 + d_2^2}{D^2 + D \cdot d_2 + d_2^2}. \quad (7)$$

Выражая d_2 в долях от D ($d_2 = xD$, $x = \frac{d_2}{D}$, $0 < x < 1$) и подставляя $d_2 = xD$ в (7), получим

$$K_\Phi = \frac{3(1 + x^2)}{(1 + x + x^2)}. \quad (8)$$

Как видно из (8), K_Φ -геометрический фактор, характеризующий соотношение размеров добавочного сопротивления и корпуса, величина

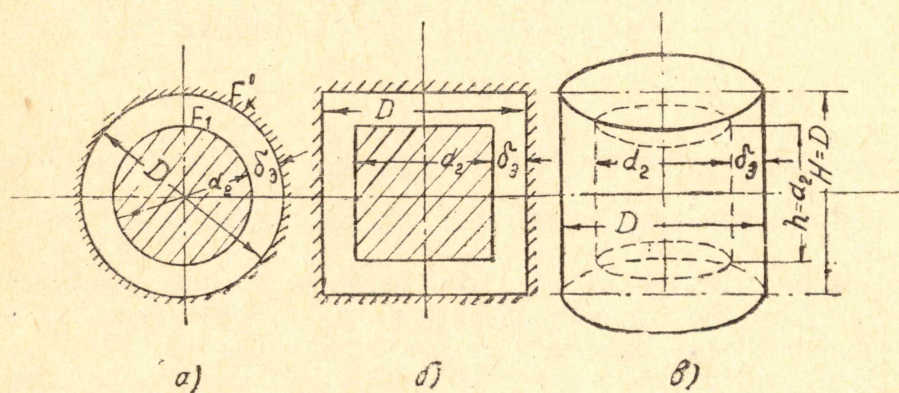


Рис. 2.

на безразмерная. Если d_2 и D близки по величине ($d_2 \rightarrow D$, $x \rightarrow 1$), то $K_\Phi \rightarrow 2$; если d_2 мало по сравнению с D ($d_2 \rightarrow 0$ или $D \rightarrow \infty$, $x \rightarrow 0$), то $K_\Phi \rightarrow 3$. При промежуточных значениях $x = 0,1; 0,2 \dots 0,9$ величина K_Φ принимает промежуточные значения

$$2 < K_\Phi < 3. \quad (9)$$

Рассмотрение случаев „куб в кубе“ и „цилиндр в цилиндре“ (рис. 2, б, в) приводит к тем же результатам.

Таким образом, для пар шаровых, кубических и цилиндрических тел при симметричном расположении сопротивления в корпусе эквивалентная толщина воздушной прослойки $\delta_э$ может быть найдена через объем воздуха внутри корпуса V и сумму поверхностей F_1 и F'_k с помощью соотношения (6), при этом K_ϕ вычисляется по (8).

При неоднотипной форме сопротивления и корпуса (цилиндр в кубе или в прямоугольном параллелепипеде и т. п.) возможно отклонение K_ϕ от указанных значений, но есть основания утверждать, что оно будет несущественным, так как в соотношении (8) для шаровых, кубических и цилиндрических тел влияние формы не проявилось.

Б. Эквивалентный коэффициент теплопроводности прослойки воздуха $\lambda_э = \epsilon_k \lambda$, где ϵ_k — коэффициент конвекции. Для плоских (вертикальных и горизонтальных), цилиндрических и шаровых прослоек ϵ_k может быть определен из критериальных уравнений [1]

$$\epsilon_k = 0,105 (Gr \cdot Pr)_m^{0,3} \text{ при } 10^3 < Gr \cdot Pr < 10^6, \quad (\partial)$$

$$\epsilon_k = 0,40 (Gr \cdot Pr)_m^{0,2} \text{ при } 10^6 < Pr \cdot Gr < 10^{10}.$$

Здесь

$$Gr = \frac{\delta_э^3 g \vartheta'}{\nu^2} \beta \text{ — критерий Грасгофа;}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{ — критерий Прандтля;}$$

$$\vartheta' = t_1 - t_2 \text{ — разность температур по стенкам газовой прослойки (в рассматриваемом случае сопротивления и внутренней поверхности корпуса), } ^\circ\text{C;}$$

$$g = 9,81 \text{ — ускорение от сил тяжести, м/сек}^2;$$

$$\nu \text{ — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м}^2/\text{сек;}$$

$$a \text{ — коэффициент температуропроводности воздуха, м}^2/\text{час;}$$

$$\beta \text{ — коэффициент объемного расширения, для газов}$$

$$\beta = \frac{1}{T}, \frac{1}{^\circ\text{K}}.$$

Индекс m означает, что все физические константы, входящие в Gr и Pr , берутся при средней температуре прослойки газа $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$.

Уравнения (1), (2) и (3) и соображения по определению $\delta_э$ и $\lambda_э$, изложенные выше, представляют основу теоретического подхода к определению температуры поверхности обмотки t_1 .

3. При использовании уравнений (1), (2) и (3) для расчета t_1 возникают трудности, состоящие в том, что в уравнения (1) и (3) входят величины α'' и $\lambda_э$, определяемые через искомые температуры t_3 и t_1 .

А. Так $\alpha'' = \alpha_k + \alpha_d$. Входящий сюда α_d определяется как

$$\alpha_d = \frac{\epsilon'' \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right]}{T_3 - T_f}. \quad (e)$$

Таким образом, α_d зависит от искомой величины t_3 . Значение α_k определяется с помощью критериальных уравнений [1]

$$\text{Nu}_f = 0,47 \text{ Gr}_f^{0,25} \quad (\text{жс})$$

$$\text{Nu}_m = 0,54 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_m^{0,25}. \quad (3)$$

В данном случае критерии Нуссельта, Грасгофа и Прандтля выражаются

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k \cdot D}{\lambda_k}; \quad \text{Gr} = \frac{D^3 g (t_3 - t_f)}{\nu^2} \cdot \beta; \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{a}.$$

Индекс f указывает, что физические параметры воздуха, входящие в критерии, определяются при температуре окружающего воздуха, а индекс m — при средней температуре пограничного слоя воздуха $t_m = \frac{t_3 + t_f}{2}$.

Поскольку в критерий Грасгофа входит t_3 , то очевидно, что α_k так же, как и α_λ , в любом случае зависит от искомой величины t_3 , что приводит к необходимости решать уравнение (4) подбором. Многократные вычисления $\alpha'' = \alpha_\lambda + \alpha_k$ с помощью (е) и (жс) или (з) весьма громоздки и трудоемки. Сокращение громоздкости и трудоемкости, а также исключение подбора t_3 , может быть достигнуто табулированием и номографированием выражения (4). Уравнение (1) перепишем в виде

$$\frac{P}{F_k} = \alpha'' (t_3 - t_f) = P_k'' = \alpha'' \vartheta_3 = f(\varepsilon'', \vartheta_3, t_f, D). \quad (10)$$

Здесь P и P_k'' — соответственно полная мощность сопротивления и удельная мощность рассеяния на корпусе.

Степень черноты ε'' для пластмасс и поверхностей, покрытых лаками и масляными красками различных цветов, может быть принята $\varepsilon'' = 0,9$. Если принять температуру окружающей среды $t_f = 20^\circ\text{C}$, то

$$P_k'' = f_1(\vartheta_3, D). \quad (10')$$

Задавая разность температур корпуса и окружающей среды ϑ_3 и придавая D различные значения, можно вычислить соответствующие P_k'' . По этим данным строится номограмма, которая позволяет найти ϑ_3 , если известны D и P_k'' , и далее определить $t_3 = \vartheta_3 - t_f$. Такая номограмма построена и приводится на рис. 3.

При построении номограммы рис. 3 расчет α_k проводился по уравнению (з), α_λ — по уравнению (е).

Б. Как видно из уравнения (3), с учетом (д) и выражения для Θ температура обмотки t_1 определяется через величины, зависящие от искомой температуры t_1 непосредственно (Θ) или в виде $\vartheta' = t_1 - t_2$ и $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$ (ε_k и $\lambda_\vartheta = \varepsilon_k \cdot \lambda$). И здесь возникает необходимость решать уравнение (3) подбором. Сокращение громоздкости и трудоемкости здесь также может быть достигнуто номографированием $\Theta = f_2(T_1, T_2)$ и $\varepsilon_k = f_3(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_m = f_4(\vartheta_3, \vartheta', t_m)$. Номограмма для определения Θ приводится на рис. 4. Для определения ε_k строится несколько номограмм, отличающихся диапазоном ϑ_3 и областью значений $(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$. Одна из таких номограмм приведена на рис. 5.

Если известно ϑ_3 и уже вычислено t_2 , то, задавая t_1' находят $\vartheta' = t_1' - t_2$ и $t_m = \frac{t_1' + t_2}{2}$, а далее из номограммы ε_k , затем $\lambda_\vartheta = \varepsilon_k \cdot \lambda$

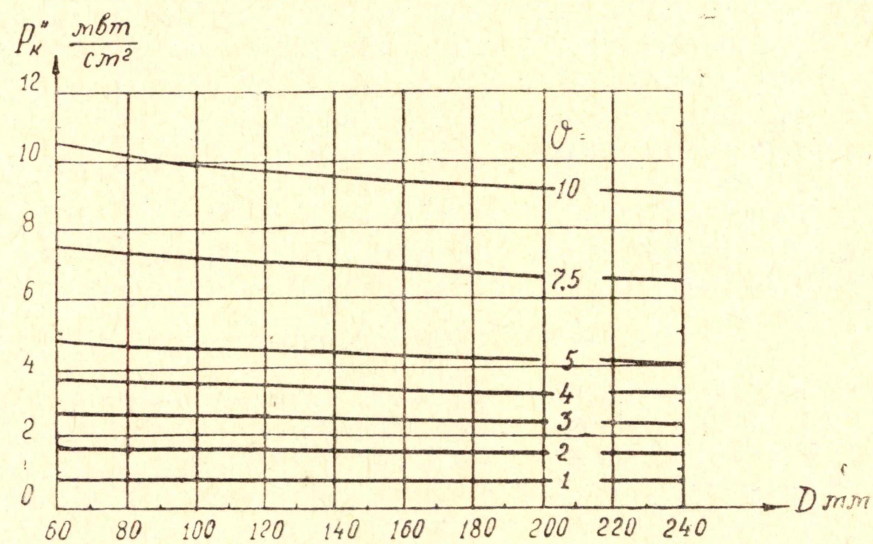
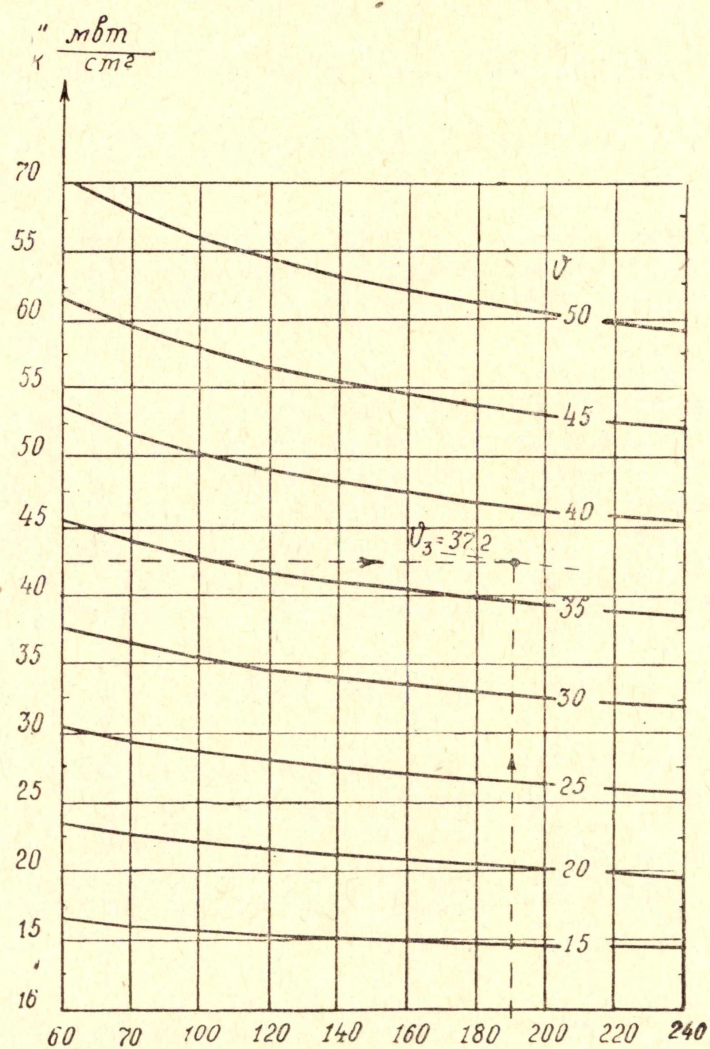


Рис. 3.

$$\theta = f(t_1, t_2)$$

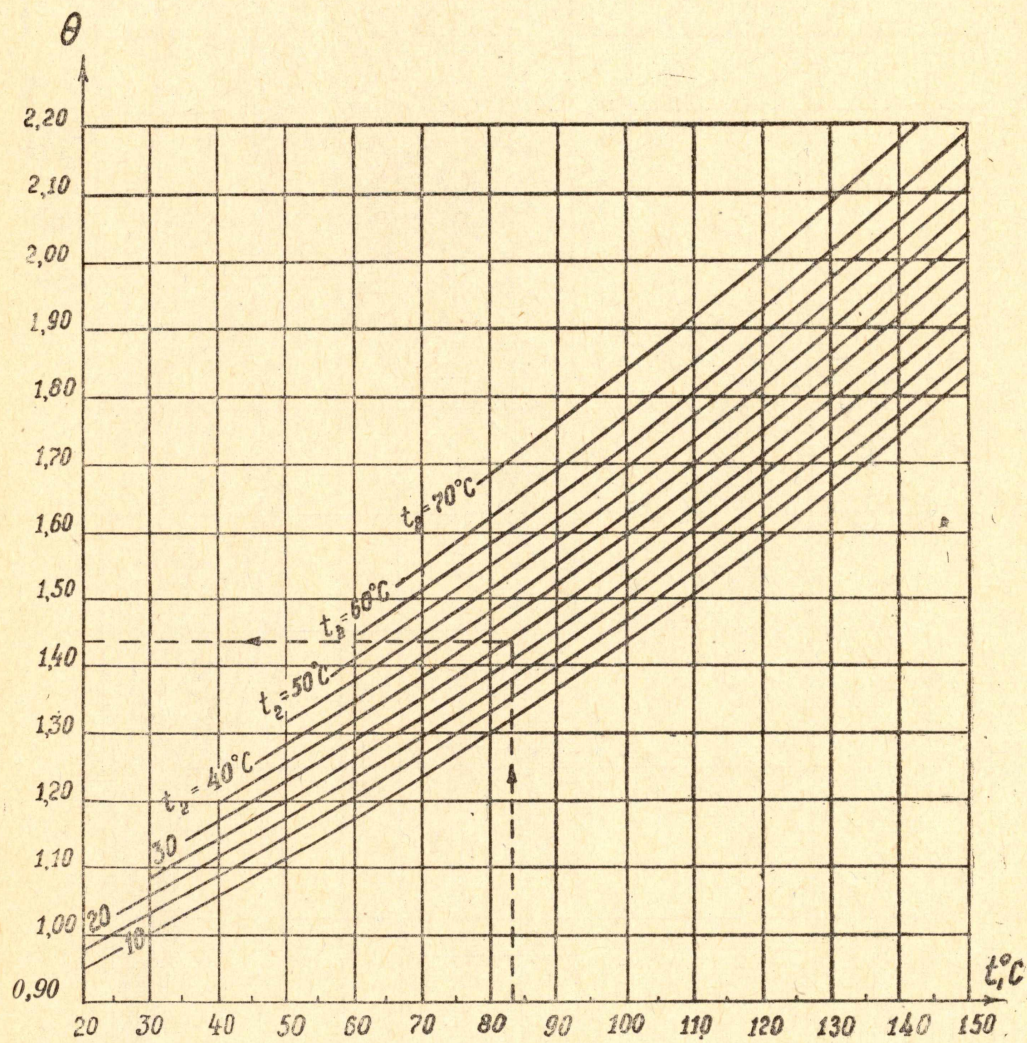


Рис. 4.

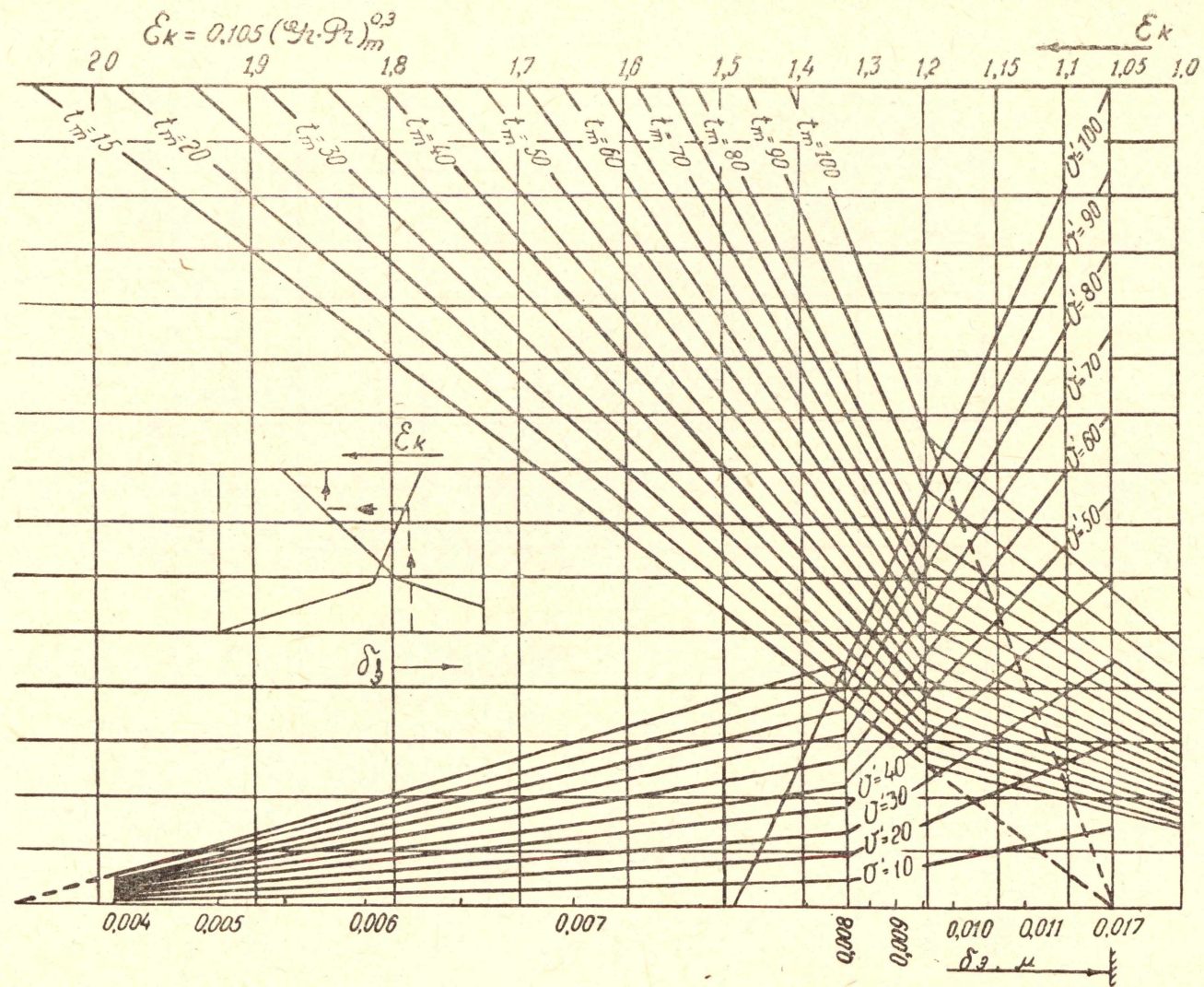


Рис. 5.

и по уравнению (3) вычисляют P . Подбор t_1 повторяется до совпадения P , полученного по уравнению (3), с значением действительного тепловыделения обмотки $P = I^2 R$.

4. С целью проверки согласования предлагаемого метода расчета с опытом, была проведена экспериментальная проверка. Схема ведения опытов представлена на рис. 6.

Добавочные сопротивления (катушка № 1 $d_2 = 10$ мм и $l = 14,8$ мм и катушка № 2 $d_2 = 21,5$ мм и $l = 22$ мм) помещались под цилиндрический корпус из плексигласа, покрытый черной масляной краской. Мощность рассеяния определялась по падению напряжения на обмотке катушки и ее сопротивлению. Температура измерялась на верхней образующей цилиндрической поверхности обмотки в средней ее части (максимальная температура поверхности обмотки) с помощью медь-

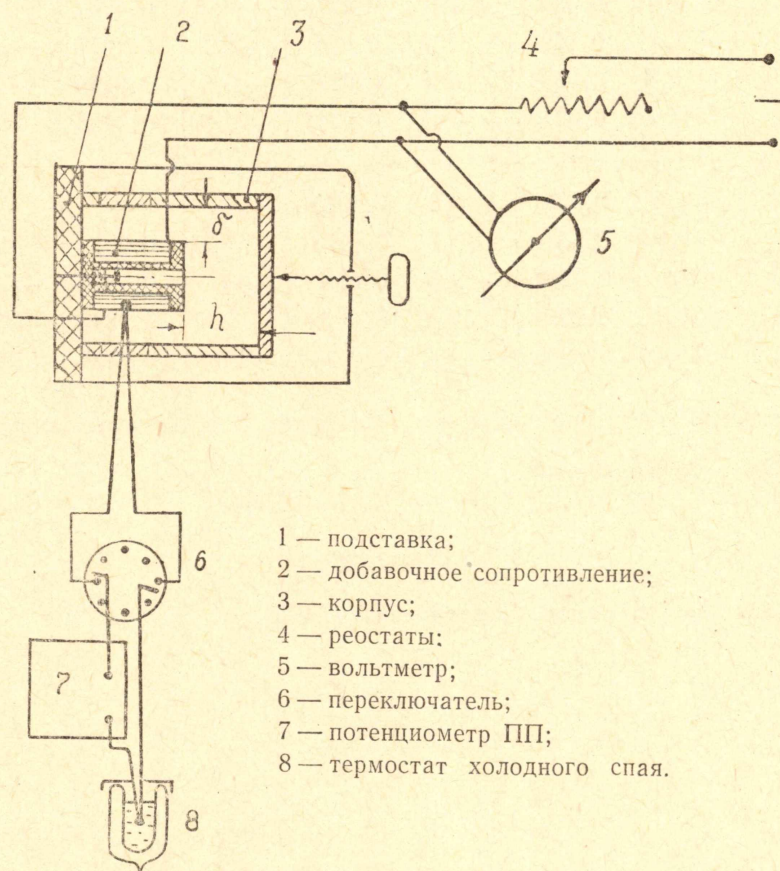


Рис. 6.

константановой термопары. Результаты опытной проверки метода расчета характеризуются табл. 1.

На основании таблицы построен график расхождения расчетных и опытных значений перегрева в зависимости от $\frac{F_1}{F_k}$, из которого установлено, что при $\frac{F_1}{F_k} > 0,08$ согласование расчетов и опыта удовлетворительное (расхождения не превышают 14—15%). При меньших значениях $\frac{F_1}{F_k}$ расхождения резко увеличиваются. Причиной этого, по нашему мнению, является то, что по мере увеличения корпуса ме-

няется характер процессов теплообмена — от явления теплообмена в замкнутом объеме происходит переход к теплообмену в неограниченном объеме.

Таблица 1

Расхождение расчетных перегревов с опытными (в %)

Режим	δ , мм	Катушка № 1				Катушка № 2			
		$h=2$, мм	$\frac{F_1}{F'_K}$	$h=50$, мм	$\frac{F_1}{F'_K}$	$h=2$, мм	$\frac{F_1}{F'_K}$	$h=50$, мм	$\frac{F_1}{F'_K}$
I	2	+ 4,2	0,565	- 2,5	0,1965	+ 7,4	0,492	+ 14,4	0,214
	5	- 6,0	0,354	- 4,9	0,1273	+ 9,7	0,393	+ 8,9	0,1605
	15	- 5,4	0,1292	- 17,4	0,056	+ 8,7	0,1817	- 1,0	0,0883
	30	- 15,9	0,0524	- 27,8	0,0272	+ 6,3	0,0845	- 7,9	0,0487
	50	- 34,4	0,02405	- 42,3	0,0144	- 9,9	0,0435	- 16,2*	0,0303
II	2	+ 9,6	0,565	- 3,2	0,1965	—	—	—	—
	5	+ 1,8	0,354	- 0,2	0,1273	+ 13,0	0,393	+ 14,6	0,1605
	15	+ 2,5	0,1292	- 8,5	0,056	+ 14,7	0,1817	- 3,3	0,0883
	30	- 16,8	0,0524	- 28,2	0,0272	+ 2,7	0,0845	- 12,3	0,0487
	50	- 35,0	0,02405	- 39,3	0,0144	- 14,7	0,0435	- 10,3*	0,0303

I — режим по току соответствует перегреву $\vartheta \approx 80^\circ$ в условиях свободного охлаждения;

II — режим — то же, $\vartheta \approx 40^\circ$.

Примечание: * — корпус с $\delta = 44$ мм и $h = 65$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. 1956.