

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА  
НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ОБМОТОК БЕТАТРОНОВ  
С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Г. Ф. ШИЛИН, Г. И. ФУКС

Надежный выбор и расчет системы охлаждения намагничивающих обмоток бетатронов требует знания распределения температуры на поверхности вертикальных рядов шин обмотки и закона теплообразования в ее объеме.

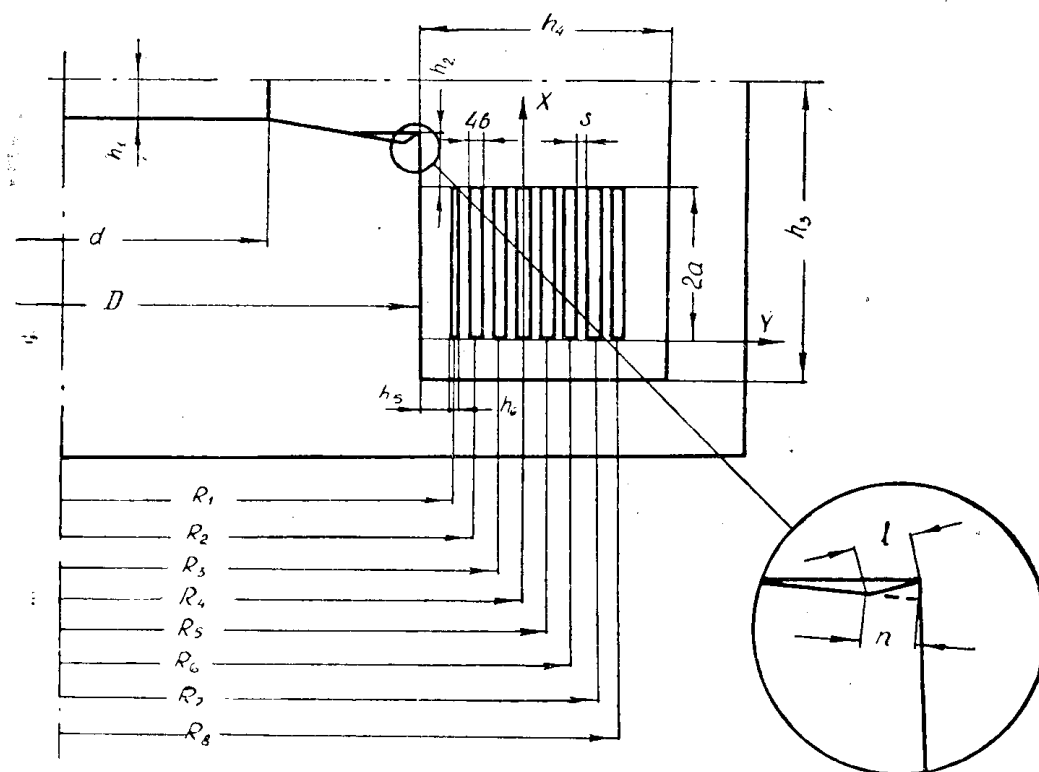


Рис. 1. К инженерному методу теплового расчета намагничивающей обмотки бетатрона.

Если тепловыделение постоянно по объему вертикального ряда шин, то закон распределения температуры по его высоте можно найти по методике, данной в [1]. Однако наши эксперименты показали, что обыч-

но тепловыделение по высоте вертикального ряда шинок линейно зависит от вертикальной координаты, то есть

$$q_v = L + Mx, \text{ вт/м}^3, \quad (1)$$

где  $x$  — вертикальная координата обмотки в  $m$  (рис. 1).

Следовательно [1], можно, пользуясь этим соотношением, определить закон изменения температуры по стенке вертикальных рядов шинок обмотки в различных случаях.

а) Воздух подается в щели обмотки снизу при  $X = 0$  (рис. 1). Тогда

$$t_{\text{ст}}(X) = t_{\text{вх}} + \frac{2U}{\text{Pe}} \text{Nu} \frac{a}{s} \sum_{m=1}^{\infty} A_m \left( \sin \mu_m X - \frac{\text{Bi}}{\mu_m} \cos \mu_m X + \frac{\text{Bi}}{\mu_m} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m (\mu_m \cos \mu_m X + \text{Bi} \sin \mu_m X). \quad (2)$$

б) Воздух подается в щели обмотки сверху при  $X = 1$ . Тогда

$$t_{\text{ст}}(X) = t_{\text{вх}} - \frac{2U}{\text{Pe}} \text{Nu} \cdot \frac{a}{s} \sum_{m=1}^{\infty} A_m [(\sin \mu_m X - \sin \mu_m) - \frac{\text{Bi}}{\mu_m} (\cos \mu_m X - \cos \mu_m)] + \sum_{m=1}^{\infty} A_m (\mu_m \cos \mu_m X + \text{Bi} \cdot \cos \mu_m X). \quad (3)$$

В формулах (2) и (3):

$$A_m = \frac{F(\mu_m) \cdot \text{sh} \frac{\mu_m}{\eta}}{\mu_m \cdot D(\mu_m) \left[ \mu_m \text{sh} \frac{\mu_m}{\eta} + \text{Bi} \text{ch} \frac{\mu_m}{\eta} \right]}; \quad (4)$$

$$D(\mu_m) = \frac{1}{2\mu_m} \{ \mu_m^2 (\mu_m + 0,5 \sin 2\mu_m) + \text{Bi}^2 (\mu_m - 0,5 \sin 2\mu_m) + 2\mu_m \cdot \text{Bi} \cdot \sin^2 \mu_m \};$$

$$F(\mu_m) = \frac{\beta}{\mu_m} [\mu_m \cdot \sin \mu_m + \text{Bi} (1 - \cos \mu_m)] + \frac{\gamma}{\mu_m^2} [\mu_m \cdot \cos \mu_m (1 - \text{Bi}) + \sin \mu_m (\text{Bi} + \mu_m^2) - \mu_m];$$

$$\beta = 4 \frac{L}{\lambda_{\text{экв}}} \cdot a^2; \quad \gamma = 8 \frac{M}{\lambda_{\text{экв}}} \cdot a^3; \quad \eta = \frac{a}{b};$$

$$X = \frac{x}{2a}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha \cdot 2a}{\lambda_{\text{экв}}}; \quad \text{Pe} = \frac{W \cdot 2s}{a^*}; \quad \text{Nu} = \frac{\alpha \cdot 2s}{\lambda_{\text{воздух}}};$$

$W$  — скорость воздуха в охлаждающих щелях обмотки в  $m/\text{сек}$ ;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в щели обмотки к воздуху с температурой  $t_{\text{вх}}$  в  $\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ;

$s$  — ширина охлаждающей щели в  $m$  (рис. 1);

$b^*$  и  $\lambda_{\text{возд}}$  — коэффициент температуропроводности и теплопроводности воздуха;

$\lambda_{\text{экв}}$  — эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки в  $\text{вт/м} \cdot \text{град}$ ;

Т а б л и ц а 1

Корни уравнения

$$\operatorname{tg} \rho_m = \frac{2B_1 \cdot \rho_m}{\rho_m^2 - B_1^2}$$

	$B_1$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
1	0,005	0,099947	3,1448	6,2848
2	0,01	0,13970	3,14799	6,28637
3	0,02	0,19966	3,15420	6,2896
4	0,03	0,24433	3,1605	6,2926
5	0,04	0,28190	3,1668	6,2956
6	0,05	0,31491	3,1731	6,29905
7	0,06	0,34468	3,1793	6,3020
8	0,07	0,37200	3,1852	6,3053
9	0,08	0,39733	3,1914	6,3084
10	0,09	0,42111	3,1979	6,3114
11	0,10	0,4353	3,20400	6,31485
12	0,20	0,62210	3,2638	6,3459
13	0,30	0,75374	3,32173	6,37710
14	0,40	0,86567	3,3773	6,4076
15	0,50	0,96020	3,43101	6,43320
16	0,60	1,0433	3,4827	6,4680
17	0,70	1,1183	3,5327	6,4977
18	0,80	1,1864	3,5810	6,5271
19	0,90	1,2488	3,6280	6,559
20	1,0	1,3052	3,67919	6,58462
21	1,1	1,3600	3,7168	6,6127
22	1,2	1,4100	3,7592	6,6406
23	1,3	1,4568	3,8007	6,6680
24	1,4	1,5009	3,8407	6,6954
25	1,6	1,5820	3,9170	6,7484
26	1,8	1,6545	3,9892	6,8006
27	2,0	1,7206	4,05740	6,85120
28	2,2	1,7806	4,1218	6,9003
29	2,4	1,8356	4,1833	6,9483
30	2,6	1,8862	4,2415	6,9946
31	2,8	1,9330	4,2965	7,0400
32	3,0	1,9763	4,3492	7,0842
33	3,5	2,0723	4,4699	7,1892
34	4,0	2,1536	4,5777	7,2868
35	4,5	2,2236	4,6742	7,3783
36	5,0	2,28445	4,76129	7,46367
37	5,5	2,3377	4,8395	7,5430
38	6,0	2,3848	4,9112	7,6174

Продолжение таблицы 1

	$B_1$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
39	6,5	2,4268	4,9762	7,6868
40	7,0	2,4645	5,0357	7,7518
41	7,5	2,4983	5,0903	7,8127
42	8,0	2,5289	5,1406	7,8715
43	8,5	2,5571	5,1872	7,9225
44	9,0	2,5824	5,2300	7,9745
45	9,5	2,6059	5,2700	8,0221
46	10	2,62768	5,30732	8,06713
47	20	2,8577	5,7253	8,6115
48	30	2,9456	5,8950	8,8509
49	40	2,9921	5,9859	8,9827
50	50	3,02090	6,04265	9,06626
51	60	3,0402	6,0809	9,1230
52	70	3,0542	6,1087	9,1642
53	80	3,0648	6,1302	9,1957
54	90	3,0731	6,1464	9,207
55	100	3,0800	6,16014	8,24480
56	$\infty$	3,1416	6,2832	9,4248

$U$  — периметр проходного сечения охлаждающей щели обмотки в  $m$ ;

$$\mu_m — \text{корни уравнения } \operatorname{tg} \mu_m = \frac{2Bi \cdot \mu_m}{\mu_m^2 - Bi^2}.$$

Первые три корня этого уравнения, найденные на ЭЦВМ „Промінь“, представлены в табл. 1.

Соотношения (2) и (3) можно упростить, если учесть, что ряды в них быстро сходятся. При инженерных расчетах можно пользоваться этими зависимостями с одним членом ряда,  $m = 1$ . Тогда:

а) воздух подается в щели обмотки снизу при  $X = 0$  (рис. 1),

$$t_{ct}(X) = t_{вх} + \frac{2U}{Pe} \cdot Nu \frac{a}{s} A_1 \left( \sin \mu_1 X - \frac{Bi}{\mu_1} \cos \mu_1 X + \frac{Bi}{\mu_1} \right) + A_1 (\mu_1 \cos \mu_1 X + Bi \sin \mu_1 X), \quad (5)$$

где  $A_1$  вычисляется по (4) при  $m = 1$ .

Координата максимальной температуры находится из выражения:

$$X_{max} = \frac{1}{\mu_1} \operatorname{arctg} \left[ \frac{-\mu_1 \left( Bi - \frac{2U}{Pe} Nu \frac{a}{s} \right)}{Bi \left( \frac{\mu_1^2}{Bi} + \frac{2U}{Pe} Nu \frac{a}{s} \right)} \right]; \quad (6)$$

б) воздух подается в щели обмотки сверху при  $X = 1$  (рис. 1),

$$t_{cr}(X) = t_{ax} - \frac{2U}{Pe} Nu \cdot \frac{a}{s} A_1 [(\sin \mu_1 X - \sin \mu_1) - \frac{Bi}{\mu_1} (\cos \mu_1 X - \cos \mu_1)] +$$

$$+ A_1 (\mu_1 \cos \mu_1 X + Bi \cdot \sin \mu_1 X). \quad (7)$$

Координата максимальной температуры определяется из соотношения:

$$X_{max} = \frac{1}{\mu_1} \operatorname{arctg} \left[ \frac{\mu_1 \left( Bi + \frac{2U}{Pe} Nu \cdot \frac{a}{s} \right)}{Bi \left( \frac{\mu_1^2}{Bi} - \frac{2U}{Pe} \cdot Nu \cdot \frac{a}{s} \right)} \right]. \quad (8)$$

Для вычисления  $A_1$  по (4) построена номограмма, что значительно сокращает труд вычислительных операций (рис. 2).

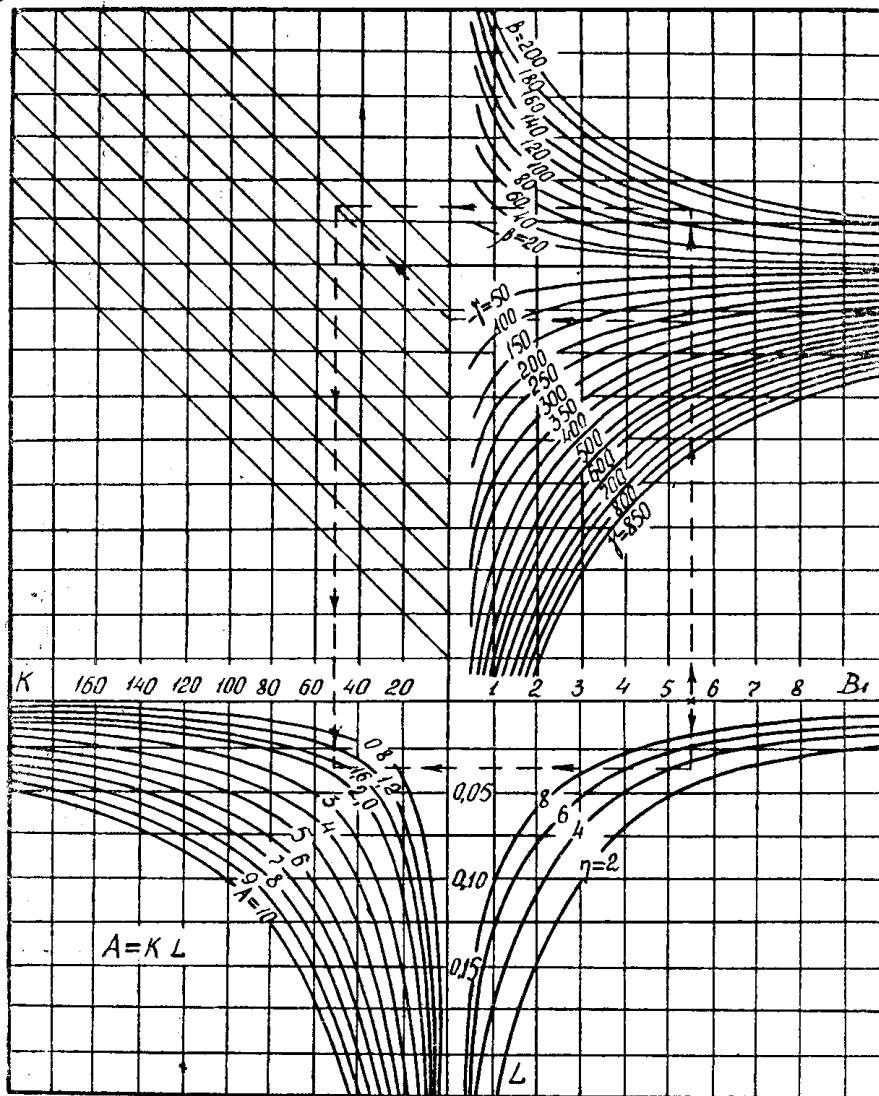


Рис. 2. Номограмма для вычисления величины  $A_1$  по формуле (4).

Тепловой расчет намагничивающей обмотки бетатрона, основанный на использовании соотношений (5) — (8), должен следовать за электро-

Таблица 2

## Инженерная методика теплового расчета намагничивающей обмотки бетагона

№ п. п.	Величина	Обозначение	Расчетные соотношения	Размерность	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Тип бетагона	—		—	
2	Высота исследуемого вертикального ряда шин	$2a$	рис. 1	$m$	Тепловой расчет надо вести по 1 и 2 рядам по счету от полюса, больше других нагруженных в тепловом отношении
3	Ширина вертикального ряда шин	$4b$	рис. 1	$m$	
4	Намагничивающая сила вторичной обмотки	$I_2 \omega_2$	—		Необходима для электромоделирования поля рассеяния бетагона для оценки тепл. образования в рядах шин
5	Сечение шинки обмотки	$k \times l$	—	$mm^2$	—
6	Сопротивление вторичной обмотки	$R$	—	$ом$	
7	Намагничивающий ток	$I_2$	—	$a$	
8	Теплоактивных потерь в меди намагничивающей обмотки	$Q$	$I_2^2 R$	$вт$	

Данные для расчета

## Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
9	Объем намагничивающей обмотки	$V$	$2(2\pi \sum_{i=1}^n R_i \cdot 4b \cdot 2a)$	$\text{м}^3$	рис. 1
10	Теплообразование в намагничивающей обмотке	$q_{v \text{ акт}}$	$q_{v \text{ акт}} = \frac{Q}{V}$	$\text{вт/м}^3$	Необходимо для нахождения тепловыделения от вихревых токов по [2]
11	Температура воздуха на входе в охлаждающие щели обмотки	$t_{\text{вх}}$	—	$^{\circ}\text{C}$	
12	Допустимая температура нагрева обмотки	$t_{\text{доп}}$	—	$^{\circ}\text{C}$	
13	Ширина охлаждающих щелей	$s$	—	$\text{м}$	рис. 1
14	Тепловыделение в объеме вертикального ряда шинок как от вихревых токов [2], так и от активных потерь в меди обмотки	$q_v$	$q_v = L + M \cdot x$	$\text{вт/м}^3$	$x - \text{в м}$
15	Направление движения воздуха в щелях		Снизу вверх или сверху вниз		рис. 1
16	Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки	$\lambda_{\text{экв}}$	$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_0 + \delta \cdot t_0$	$\text{вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$	Найдено из опыта для шинки $10 \times 3,28 \text{ м} \cdot \text{м}^2$ : 1) оплетка шин—два слоя стекловолокна (ПСД [5]), пропитка—бакелитовый лак, $\lambda_{\text{экв}} = 2,523 + 2,03 \cdot 10^{-4} \cdot t \text{ вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ; 2) оплетка та же, пропитка—лак № 447 ГОСТ 6244—52, $\lambda_{\text{экв}} = 1,452 + 9,995 \cdot 10^{-4} \cdot t \text{ вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
17	Суммарная площадь проходного сечения всех охлаждающих каналов 2 частей обмотки	$\sum_i S_i$		м <sup>2</sup>	рис. 1

Тепловой расчет намагничивающей обмотки бетагона

1	2	3	4	5	6
1	Скорость движения воздуха в охлаждающих каналах обмотки	$W$	—	м/сек	Задаются
2	Критерий Пекле	$Pe$	$Pe = \frac{W \cdot 2s}{a^*}$	—	Теллофизические характеристики воздуха берутся при $t_{вх}^{\circ}C$
3	Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки при $t$ допус.	$\lambda_{экв}$	$\lambda_{экв} = \lambda_0 + \delta \cdot t_{доп}$	вт/м <sup>2</sup> °C	
4	Периметр проходного сечения 1 погонного метра щели	$U$	$U = 1 + s + 1 + s$	м	Расчет удобнее вести для 1 погонного метра щели
5	Коэффициент теплоотдачи в щели обмотки	$\alpha$	$Nu = f(Re, Pr, Gr)$	вт/м <sup>2</sup> °C	По [3] или [4] в зависимости от режима течения
6	Критерий Био	$Bi$	$Bi = \alpha \cdot 2a / \lambda_{экв}$	—	
7	Корень трансцендентного уравнения	$\mu_1$	$tg \mu_1 m = \frac{2Bi \cdot \mu_1 m}{\mu_1^2 m - Bi^2}$		Из таблицы № 1



Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
8	Комплекс	$\beta$	$\beta = 4La^2/\lambda_{\text{экв}}$	°C	
9	Комплекс	$\gamma$	$\gamma = 8M \cdot a^3/\lambda_{\text{э.св}}$	°C	
10	Отношение размеров вертикального ряда шинок	$\eta$	$\eta = \frac{a}{b}$		Рис. 1
11	Коэффициент в формулах (5)–(8)	$A_1$	—	°C	Из номограммы рис. 2 по величинам $B_1, \beta, \gamma, \eta$
12	Максимальная температура на поверхности ряда шинок и $t_{\text{доп}}$ (5),—(8)	$t_{\text{max}}$	Аналитически или графически	°C	
13	Сравниваем $t_{\text{max}}$ и $t_{\text{доп}}$		Должно быть совпадение, то есть $t_{\text{max}} = t_{\text{доп}}$		При несовпадении $t_{\text{max}}$ и $t_{\text{доп}}$ задаются другим значением скорости воздуха $W$ , и расчет повторяется
14	Полное количество воздуха, необходимое для охлаждения обмотки	$Q'$	$Q' = W \cdot \sum_i S_i \cdot 3600$	м <sup>3</sup> /час	Величина $Q'$ необходима для выбора вентилятора системы охлаждения бетаатрона

техническим расчетом. Последний дает геометрические размеры и ряд электротехнических параметров, которые необходимы для количественной оценки распределения тепла в вертикальных рядах шинок обмотки методом моделирования вихревого поля [2].

Удобно вести тепловой расчет в форме табл. 2, записав в первой части все данные, необходимые для расчета. В конечном итоге рассчитывается величина скорости воздуха в охлаждающих каналах обмотки, при которой максимальная температура на поверхности обмотки не превышает допустимую. По скорости воздуха и суммарной площади проходного сечения всех охлаждающих каналов верхней и нижней обмоток бетафона рассчитывается общее количество воздуха, потребное для охлаждения обмотки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Иванов, Г. Ф. Шилин. Тепловой расчет намагничивающей обмотки бетафона с воздушным охлаждением. Изв. вузов-Электромеханика, № 8, 1964.
  2. С. И. Лурье. Математическое моделирование магнитных полей рассеяния трансформаторов и реакторов на электропроводящей бумаге. Электричество, № 10, 1965.
  3. Ф. М. Тарасов. Тонкослойные теплообменные аппараты. Машгиз, 1964.
  4. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
  5. Электротехнический справочник, т. 1. Госэнергоиздат, 1962.
-