

ЧУЧМАН Г. П.,  
инженер

### О ДОПУСТИМЫХ ПО УСЛОВИЯМ НАГРЕВА ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ ПЛОСКИХ ШИН

Допустимый по условиям нагрева ток шины определяется из выражения

$$I_d = \sqrt{\frac{(\alpha_d + \alpha_{к.ср})(\vartheta_w - \vartheta_f) F}{R_{\vartheta}}} a, \quad (1)$$

где  $\alpha_d$  — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием,  $вт/м^2$ ;  
 $\alpha_{к.ср}$  — среднее по поверхности шины значение коэффициента теплоотдачи конвекцией,  $вт/м^2$ ;  
 $F$  — поверхность выделенного участка шины,  $м^2$ ;  
 $R_{\vartheta}$  — активное сопротивление участка шины при расчетной температуре  $\vartheta_w$ ,  $ом$ ;  
 $\vartheta_w$  и  $\vartheta_f$  — соответственно температура поверхности шины и охлаждающего воздуха,  $^{\circ}C$ .

Значения  $\alpha_d$  и  $R_{\vartheta}$  с достаточной точностью могут быть найдены расчетным путем. Более сложным является определение коэффициента теплоотдачи свободной конвекцией  $\alpha_{к.ср}$ , зависящего от размеров и формы поверхности, ее расположения в гравитационном поле, температуры воздуха и охлаждающей среды, теплофизических свойств воздуха.

В «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ) приводятся таблицы допустимых токовых нагрузок открыто прокладываемых горизонтальных шин, расположенных на ребро, и даются рекомендации по уменьшению нагрузок при расположении шин плашмя. Данные о токовых нагрузках наклонно расположенных шин отсутствуют. При расчете этих таблиц теплоотдача конвекцией определялась по формуле

$$\alpha_{к.ср} = 1,5(\vartheta_w - \vartheta_f)^{0,35}, \quad (2)$$

полученной экспериментальным путем в лаборатории им. Смурова в 1935 г. [1]. Из формулы (2) вытекает, что теплоотдача естественной конвекцией не зависит от геометрических размеров шины. Это противоречит результатам теоретических и экспериментальных исследований теплоотдачи плоских поверхностей

[2], а также ряда экспериментальных работ по теплоотдаче плоских шин, установленных на ребро [3, 4, 7].

На основании теории подобия данные экспериментальных исследований теплоотдачи в условиях свободной конвекции при небольших разностях температур могут быть представлены в виде критериального уравнения

$$\overline{Nu} = c (GrPr)^n, \quad (3)$$

где  $\overline{Nu} = \frac{\alpha_k H}{\lambda}$  — число Нуссельта, подсчитанное по среднему значению коэффициента теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$ ;

$Gr = \frac{\beta g H^3 (\vartheta_w - \vartheta_f)}{\nu^2}$  — число Грасгофа;

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

$\beta, \nu, a, \lambda$  — соответственно температурный коэффициент объемного расширения, коэффициенты кинематической вязкости, теплопроводности воздуха, взятые по средней температуре пограничного теплового слоя

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_w + \vartheta_f}{2};$$

$H$  — определяющий размер, м.

Определяемые экспериментом коэффициенты  $c$  и  $n$  уравнения (3) зависят от формы поверхности, ее расположения в поле течения и характера течения охлаждающей среды. Для вертикальной поверхности при ламинарном режиме течения  $n=0,25$ , коэффициент  $c$ , по данным разных авторов, колеблется от 0,52 до 0,59. При этом за определяющий размер  $H$  принимается высота поверхности.

По данным М. А. Михеева [2], ламинарный пограничный слой у вертикальной поверхности имеет место при значениях комплекса  $GrPr$  от  $5 \cdot 10^2$  до  $2 \cdot 10^7$ , что при значениях  $\vartheta_w = 70^\circ\text{C}$  и  $\vartheta_f = 25^\circ\text{C}$  соответствует высоте поверхности  $H = (0,006 \div 0,2)$  м. По данным других исследований [5, 6], в тех же условиях ламинарный пограничный слой сохраняется до значения  $H = (0,45 \div$

0,6) м. Ширина полосы плоской стандартной шины не превышает 0,12 м, следовательно, течение охлаждающего шину воздуха носит ламинарный характер.

Н. А. Погарский [8] предлагал использовать критериальные уравнения типа (3) для расчета нагрева электрических аппаратов и токоведущих частей. Е. Н. Загоровский [7], исследовавший теплоотдачу плоских шин сечением  $80 \times 8$  мм и  $120 \times 10$  мм, от-

мечает хорошее совпадение результатов экспериментов с данными, полученными из уравнения (3).

Нами была исследована теплоотдача конвекцией плоских горизонтально расположенных шин неограниченной длины при различных углах наклона относительно вертикали большей плоскости [9, 10, 11]. Опыты проводились на образцах с шириной плоскости 40, 60 и 100 мм при соотношении толщины к ширине  $\frac{b}{h} = \frac{1}{5} \div \frac{1}{11}$ . Для расположения шин плашмя и наклонно к вертикали раздельно определялась теплоотдача поверхностей, обращенных вверх и вниз. Температурный напор изменялся от 12 до 60°C, температура среды — от 14 до 28°C. Значения комплекса  $Gr Pr$  лежали в пределах  $1 \cdot 10^5 \div 5,3 \cdot 10^6$ , что соответствует устойчивому ламинарному течению охлаждающего воздуха. Результаты 300 опытов, обработанные по методу наименьших квадратов, представлены в виде критериальных уравнений

$$\bar{Nu} = c (GrPr)^n \quad \text{и} \quad \bar{Nu} = c (GrPr \cos \varphi)^n,$$

где  $\varphi$  — угол наклона большей плоскости шины к вертикали. В качестве определяющего размера принимался полупериметр сечения шины  $H = h + b$ . Такой выбор определяющего размера позволяет учесть влияние меньшей грани шины на среднее значение коэффициента теплоотдачи конвекцией.

Максимальная относительная погрешность измерений для разных режимов лежала в пределах от 6,2% до 18,7%. Разброс опытных точек относительно полученных эмпирических зависимостей не превосходил  $\pm 10\%$ .

Для углов наклона  $\varphi = 0^\circ + 60^\circ$  как для поверхности, обращенной вверх, так и для поверхности, обращенной вниз, экспериментальные данные хорошо аппроксимируются зависимостью

$$\bar{Nu}_{\text{накл}} = 0,56 (GrPr \cos \varphi)^{0,25} . \quad (4)$$

При вертикальном расположении большей плоскости шины  $\varphi = 0^\circ$  и уравнение (4) принимает вид

$$\bar{Nu}_{\text{верт}} = 0,56 (GrPr)^{0,25} , \quad (5)$$

что хорошо согласуется с известными данными по теплоотдаче вертикальной плоской поверхности.

При углах наклона, превышающих 60°, характер течения воздуха у поверхности, обращенной вверх, существенно отличается от течения воздуха у обращенной вниз поверхности. Кроме того, на теплоотдачу верхней поверхности шины заметно влияют потоки воздуха, нагретого нижней поверхностью. Получены сле-

дующие критериальные зависимости для конвективной теплоотдачи обращенной вверх поверхности двухсторонне охлаждаемой шины:

при  $\varphi = 75^\circ$

$$\bar{Nu} = 0.23 (GrPr)^{0.29}; \quad (6)$$

при  $\varphi = 90^\circ$  (расположение плазмы)

$$\bar{Nu} = 0.104 (GrPr)^{0.34}. \quad (7)$$

Аналогичные зависимости для поверхности, обращенной вниз:

при  $\varphi = 75^\circ$

$$\bar{Nu} = 0.70 (GrPr)^{0.22}; \quad (8)$$

при  $\varphi = 90^\circ$

$$\bar{Nu} = 1.50 (GrPr)^{0.16}. \quad (9)$$

Из критериального уравнения (3) среднее значение коэффициента теплоотдачи конвекцией плоской поверхности

$$\bar{\alpha}_k = c \lambda \left[ \frac{3 g Pr (\vartheta_w - \vartheta_f)}{r^2} \right]^n H^n \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}. \quad (10)$$

Среднее по поверхности шины значение коэффициента теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_{k, \text{ ср}} = \frac{\bar{\alpha}'_k + \bar{\alpha}''_k}{2} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град},$$

где  $\bar{\alpha}'_k$  и  $\bar{\alpha}''_k$  — соответственно средние значения коэффициентов теплоотдачи для поверхностей, обращенных вверх и вниз. Значения коэффициентов  $c$  и  $n$  уравнения (10) в соответствии с углом наклона шины берутся из выражений (5) — (9).

Приняв согласно ПУЭ расчетные температуры для определения токовых нагрузок шин  $\vartheta_w = 70^\circ\text{C}$  и  $\vartheta_f = -25^\circ\text{C}$ , получим: для  $\varphi = 0^\circ \div 60^\circ$

$$\alpha_{k, \text{ ср}} = 3,67 \left( \frac{\cos \varphi}{H} \right)^{0.25} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}; \quad (11)$$

для  $\varphi = 75^\circ$

$$\alpha_{k, \text{ ср}} = \left( \frac{1,79}{H^{0,13}} + \frac{1,20}{H^{0,34}} \right) \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}; \quad (12)$$

для  $\varphi = 90^\circ$

$$\alpha_{k, \text{ ср}} = \left( 2,42 H^{0,02} + \frac{0,69}{H^{0,52}} \right) \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}. \quad (13)$$

По новейшим данным степень черноты  $\epsilon$  поверхности, окрашенной масляной краской, колеблется для разных цветов от 0,92 до 0,96. Приняв в расчетах  $\epsilon = 0,92$ , по известным формулам получим для тех же температурных условий значение коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием

$$\alpha_1 = 6,93 \text{ вт./м}^2\text{град.} \quad (14)$$

Таблица 1  
Допустимые токовые нагрузки однополосных шин  
прямоугольного сечения при постоянном токе

Размеры шины $b \times h$ , мм	Медные шины		Алюминиевые шины	
	Токовая нагрузка, а	В % к токовым нагрузкам, данным в ПУЭ	Токовая нагрузка, а	В % к токовым нагрузкам, данным в ПУЭ
120 × 10	2960	100,3	2290	99,6
120 × 8	2630	101,2	2040	100,0
100 × 10	2510	101,6	1940	101,6
100 × 8	2230	102,3	1720	101,8
100 × 6	1920	102,5	1480	101,7
80 × 10	2060	103,5	1590	103,2
80 × 8	1820	103,7	1410	104,1
80 × 6	1560	103,3	1210	103,4
60 × 10	1590	104,2	1230	104,3
60 × 8	1410	104,8	1090	104,8
60 × 6	1210	105,6	930	105,7
50 × 6	1020	106,2	790	106,0
50 × 5	930	106,9	720	107,3
40 × 5	760	107,8	590	108,0
40 × 4	680	108,7	520	108,2
30 × 4	520	109,3	400	108,2
25 × 3	380	111,8	290	109,4
20 × 3	310	112,7	240	111,6
15 × 3	240	114,2	190	115,2

В табл. 1 приведены рассчитанные по формулам (1), (11), (14) допустимые токовые нагрузки при постоянном токе однополосных расположенных на ребро медных шин. Как видно из таблицы, токовые нагрузки, регламентируемые ПУЭ, значительно занижены, особенно для шин с малой шириной полосы. Аналогичные результаты получаются и при переменном токе.

Для наклонно расположенных шин расчеты по формулам (11), (14) показывают, что при углах наклона к вертикали  $\varphi = 0^\circ \div 30^\circ$  допустимые токовые нагрузки остаются такими же, как и при расположении на ребро.

При больших значениях угла наклона токовые нагрузки должны быть уменьшены по сравнению с нагрузками шин, расположенных на ребро:

для  $\varphi = 45^\circ$  — на 2%;       $\varphi = 75^\circ$  — 6%;  
 $\varphi = 60^\circ$  — 4%;       $\varphi = 90^\circ$  — 8%.

Указанное снижение при углах наклона от 30° до 90° может быть учтено умножением токовой нагрузки шин, расположенных на ребро, на коэффициент

$$K_{\tau} = \frac{780 - \varphi}{750}. \quad (15)$$

Приведенные выше критериальные уравнения могут быть использованы и для расчета допустимых токовых нагрузок многополосных шин, а также в расчетах на нагрев корпусов аппаратов, приборов и т. п. устройств, ограниченных плоскими стенками.

Внесение новых рекомендаций по выбору сечения плоских шин в ПУЭ обеспечило бы существенную экономию цветных и черных металлов.

### Выводы

1. Получены опытным путем критериальные уравнения для расчета конвективной теплоотдачи поверхностей шин, расположенных на ребро, плашмя и под углом к вертикали.

2. Расчет допустимых токовых нагрузок медных и алюминиевых плоских шин дает результаты, превышающие данные ПУЭ.

3. Даны рекомендации по снижению допустимых токовых нагрузок плоских шин, расположенных плашмя и наклонно к вертикали.

4. В ПУЭ следует внести новые указания по выбору шин прямоугольного сечения из условий допустимой температуры их нагрева.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лысов Н. Е. Выбор однопроводниковых шин с точки зрения нагрева при нормальном режиме. «Электричество», 1935, № 2.
2. Михеев М. А. Теплопередача. Госэнергоиздат, 1957.
3. H. B. Dwight. Electrical Coils and Conductors. Mc.-Graw-Hill Book Company, 1945.
4. Руцкий А. И. Железные шины распределительных устройств. Минск, Белгосиздат, 1947.
5. Еникеев М. П. Теплоотдача плоской поверхности при различных углах ее наклона в случае свободного движения воздуха. Труды Казанского сельскохозяйственного института, вып. 42-й, 1960.
6. Эйгенсон Л. С. О кризисе ламинарного течения вязкой жидкости. «Теплоэнергетика», 1957, № 12.
7. Загоровский Н. Е. Многоамперные токопроводы. Диссертация, КПИ, 1961.
8. Погарский Н. А. Применение теории подобия при расчете нагрева электрических аппаратов. «Вестник электропромышленности», 1957, № 2.
9. Кудряшов Л. И., Чучман Г. П. Влияние угла наклона плоских токоведущих шин на условия их охлаждения. В сб.: «Проблемы улучшения механизации сельскохозяйственного производства», Минск, изд-во «Урожай», 1963.
10. Чучман Г. П. Экспериментальное исследование теплоотдачи наклонной плоской поверхности при естественной конвекции в условиях двухмерного ламинарного потока охлаждающей жидкости. Сборник научных трудов аспирантов, БИМСХ, Минск, изд-во «Урожай», 1965.