

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Д. С. Сопот

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Т. В. Алферова

Многообразие существующих в настоящее время печей сопротивления и значительное число фирм-производителей, особые условия нагрева: наличие защитной атмосферы, вакуума, специфические требования к материалу нагревателей – делают актуальной задачу электрического расчета и выбора нагревательных элементов данных печей при проектировании и в условиях эксплуатации.

Исходными данными для электрического расчета являются:

- 1) мощность печи (или зоны для многозонных печей), полученная в результате теплового расчета;
- 2) мощность тепловых потерь через кладку печи или зоны;
- 3) конечная температура нагрева изделий;
- 4) характеристика нагреваемых изделий: габаритные размеры, материал;
- 5) напряжение питающей сети;
- 6) особые условия нагрева.

Нагревательные элементы могут получать питание непосредственно от цеховой сети напряжением 220, 380 или 660 В или от понижающих электропечных трансформаторов, специально разработанных для электрических печей сопротивления [1], [2].

Цель электрического расчета заключается в определении размеров (сечения и длины) нагревателей (по фазам) в соответствии с требуемым для выделения необходимой мощности сопротивлением, а также в зависимости от условий теплообмена между нагревателями и нагреваемыми изделиями.

Задача расчета нагревательных элементов состоит в определении их геометрических размеров, при которых температура не превышает допустимую, а мощность соответствует расчетной величине. Расчетными геометрическими размерами чаще всего являются: сечение (диаметр или размеры сторон) и длина проволоки, прутка, ленты, из которых изготавливают нагревательный элемент; количество витков, зигзагов и их шаг; длина и диаметр спирали и др.

Исходными данными для расчета служат расчетная мощность, напряжение питания, условия теплоотдачи, конструктивное исполнение нагревателя, температура нагревательного элемента, поверхности нагревателя и среды, материал нагревательного элемента, параметры его электро- и теплофизических характеристик и др.

В последнее время наиболее распространены методы расчета нагревательных элементов по удельной мощности и рабочему току нагревателя [3].

Наиболее точным является расчет по удельной поверхностной мощности, который основан на совместном решении двух уравнений:

$$P = p_{уд} A = p_{уд} \Pi l; \quad (1)$$

$$P = U_{\phi}^2 / R = U_{\phi}^2 S / (\rho_{\theta} l), \quad (2)$$

где  $P$  – мощность нагревателя, Вт;  $p_{уд}$  – удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/м;  $A$  – площадь поверхности нагревателя, м;  $\Pi$  – периметр сечения нагрева-

теля, м;  $l$  – длина нагревателя, м;  $U_{\phi}$  – фазное напряжение, приложенное к нагревателю, В;  $R$  – электрическое сопротивление нагревателя, Ом;  $S$  – площадь сечения нагревателя, м<sup>2</sup>;  $\rho_{\theta}$  – удельное электрическое сопротивление нагревателя при рабочей температуре  $\theta$ , Ом · м.

Для нагревателей круглого сечения (проволока, прутки),  $\Pi = \pi d$ ,  $S = \pi d^2/4$ , где  $d$  – диаметр сечения нагревателя, м:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_{\theta}P_c^2}{\pi^2 U_{\phi}^2 p_{уд}}}; \quad (3)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_c U_{\phi}^2}{4\pi\rho_{\theta}p_{уд}^2}}. \quad (4)$$

По методике [4] в качестве примера выполним электрический расчет нагревательных элементов камеры мощностью 30 кВт для сушки электродвигателей после ремонта. Нагреватель – проволочная спираль из сплава Х23Н18 (900 °С) с относительными коэффициентами излучения нагреваемых изделий ( $\epsilon_{н.т}$ ) и нагревателя ( $\epsilon_n$ ), равными, соответственно, 0,68 и 0,39. Максимальная температура сушки составляет 160 °С. Отношение площади тепловоспринимающей поверхности электродвигателей ( $A_{н.т}$ ), к площади поверхности стен камеры, занятой нагревателями ( $A_{ст}$ ), составляет 0,35. Напряжение сети 380/220 В. Удельное сопротивление материала нагревателя при температуре 20 °С составляет  $1,44 \cdot 10^{-6}$  Ом · м.

Расчет выполняем в следующей последовательности:

– определяем приведенный коэффициент излучения реального нагревателя:

$$C_{пр} = \frac{5,7}{\left[ \frac{1}{\epsilon_{н.т}} + \frac{A_{н.т}}{A_{ст}} \left( \frac{1}{\epsilon_n} - 1 \right) \right]} = \frac{5,7}{\left[ \frac{1}{0,39} + 0,35 \left( \frac{1}{0,68} - 1 \right) \right]} = 2,09 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

– определяем температуру двигателей при сушке:

$$T_{н.т} = t_{н.т} + 273 = 160 + 273 = 433 \text{ К};$$

– определяем температуру нагревателей:

$$T_n = t_n + 273 = 900 + 273 = 1173 \text{ К}.$$

Удельная поверхностная мощность идеального нагревателя по закону Стефана-Больцмана:

$$P_{уд.ид} = c_{пр} \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{н.т}}{100} \right)^4 \right] = 2,09 \left[ \left( \frac{1173}{100} \right)^4 - \left( \frac{433}{100} \right)^4 \right] = 38,8 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Удельная поверхностная мощность реального нагревателя:

$$P_{уд} = P_{уд.ид} \alpha_{эф} \alpha_{ш} \alpha_c \alpha_p, \quad (5)$$

где  $\alpha_{эф}$  – поправочный коэффициент, который характеризует эффективность излучения данной системы нагревателя, для проволочной спирали  $\alpha_{эф} = 0,32$ ;  $\alpha_{ш}$  – коэффициент шага, принимаем  $\alpha_{ш} = 1,4$  [5];  $\alpha_c$  – поправочный коэффициент, определяющий влияние приведенного коэффициента излучения реального нагревателя, при  $c_{пр} = 2,09 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,  $\alpha_c = 0,6$  [5];  $\alpha_p$  – учитывает влияние относительных размеров нагреваемого тела на  $p_{уд}$  и зависит от отношения  $A_{н.т}/A_{ст}$ , при этом отношении, равном 0,35,  $\alpha_p = 0,45$  [5], тогда

$$p_{уд} = 38,8 \cdot 10^3 \cdot 0,32 \cdot 1,4 \cdot 0,6 \cdot 0,45 = 4,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Мощность одной спирали:

$$p_c = \frac{p}{mn} = \frac{30}{3 \cdot 2} = 5 \text{ кВт},$$

где  $m$  – число фаз;  $n$  – число параллельных спиралей на фазу.

Согласно [5] температурный коэффициент хромоникелевого сплава равен 0,000059 1/°C.

Удельное сопротивление сплава при температуре 900 °C:

$$p_0 = p_{20} [1 + \alpha_R (t_n - 20)] = 1,44 \cdot 10^{-6} [1 + 0,000059(900 - 20)] = 1,51 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

При соединении нагревателей в звезду  $U_{ф} = 220 \text{ В}$ .

Диаметр проволоки нагревателя по формуле (3):

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,51 \cdot 10^{-6} (5 \cdot 10^3)^2}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 4,7 \cdot 10^3}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Длина проволоки одной спирали по формуле (4):

$$l = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^3 \cdot 220^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,51 \cdot 10^{-6} (4,7 \cdot 10^3)^2}} = 83,2 \text{ м}.$$

Шаг спирали:  $h = (3,2 \dots 4,8)d = 3,2 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} = 13,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Диаметр спирали:  $D = (6 \dots 10)d = 10 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} = 41,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Число витков спирали:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{h^2 + (\pi D)^2}} = \frac{83,2}{\sqrt{(13,1 \cdot 10^{-3})^2 + (3,14 \cdot 41 \cdot 10^{-3})^2}} = 643.$$

Длина одной спирали:  $L = \omega h = 643 \cdot 13,1 \cdot 10^{-3} = 8,42 \text{ м}$ .

Для упрощения расчетов в дальнейшем будет разработана компьютерная программа «Resistance furnaces», позволяющая автоматизировать процесс электрического расчета и выбора нагревателей печей сопротивления из созданной базы данных.

## Литература

1. Чередниченко, В. С. Электрические печи сопротивления. Конструкции и эксплуатация электропечей сопротивления / В. С. Чередниченко, А. С. Бородачев, В. Д. Артемьев ; под ред. В. С. Чередниченко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – Т. 2. – 571 с.
2. Сокунов, Б. А. Электротермические установки : учеб. пособие / Б. А. Сокунов, Л. С. Грובהва. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – 122 с.
3. Заяц, Е. М. Электротехнология : учеб. пособие / Е. М. Заяц. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 400 с.
4. Гайдук, В. Н. Практикум по электротехнологии / В. Н. Гайдук, В. Н. Шмигель. – М. : Агропромиздат, 1989. – 101 с.
5. Алферова, Т. В. Практическое пособие по курсу «Электротехнологические установки» / Т. В. Алферова, Н. В. Токочакова. – Гомель : ГПИ им. П. О. Сухого, 1996. – 43 с.