

А.А. КИРАКОСЯН, С.Г. НЕРСЕСЯН, Ю.А. ОГАНЕСЯН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Проведено исследование СКТ в сухих трансформаторах с учетом конвективного и лучистого теплообмена на поверхностях. Получено аналитическое выражение  $Nu = C_0 K_{\text{скт}} K_{\epsilon} K_{\text{Pe}} (Ra)^n$ , погрешность которого не превышает 2%.

**Ключевые слова:** теплообмен, степень черноты, критерий, воздух, стенка.

При проектировании трансформаторов, а также других электротехнических устройств важное значение имеют системы охлаждения. Для этого необходимо учесть свободно-конвективный теплообмен (СКТ) в реальном воздушном пространстве с учетом лучистого теплообмена.

СКТ в реальном или идеальном воздушном пространстве, где имеются или отсутствуют дополнительные движения и завихрения воздуха, посвящено большое количество исследований, в которых предлагалось увеличение коэффициента  $C$  от 0,54 до 0,94 [2] в общеизвестном выражении Нуссельта [1]:

$$Nu = C (Ra)^n, \quad (1)$$

где  $Ra = GrPr$  - критерий Релея;  $Gr = g\beta\vartheta_{\text{ст}}H^3/\nu_{t_0}^2$  - критерий Грасгофа;  $Pr$  - критерий Прандтля;  $g$  - гравитационное ускорение  $M^2/c$ ;  $\beta$  - коэффициент объемного расширения воздуха,  $gr^{-1}$ ;  $\vartheta_{\text{ст}} = t_{\text{ст}} - t_0$ ;  $t_{\text{ст}}$ ,  $t_0$  - температура поверхности стенки и воздуха,  $^{\circ}C$ ;  $H$  - высота стенки,  $M$ ;  $\nu_{t_0}$  - коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре  $t_0$ ,  $M^2/c$ .

При решении данной задачи учитывается зависимость физических параметров воздуха от температуры, а также предполагается наличие дополнительных движений и завихрений воздуха, которые описываются числом Пекле:

$$Pe = Re Pr,$$

где  $Re = \omega_0 H / \nu_{t_0}$  - критерий Рейнолдса;  $\omega_0$  - скорость воздуха в нижней кромке поверхности стенки,  $M/c$ .

Для вывода расчетных выражений используем уравнения теплового баланса. Основной тепловой поток ( $Q$ ) от внутренних источников тепла передается в окружающую среду с помощью СКТ ( $Q_K$ ) и теплового излучения ( $Q_L$ ):

$$Q = Q_{\text{кон}} + Q_L, \quad (2)$$

$$Q_K = \alpha_K H \vartheta_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_K$  - средний коэффициент теплоотдачи при СКТ на плоских поверхностях стен трансформатора, определяемый выражением [3]

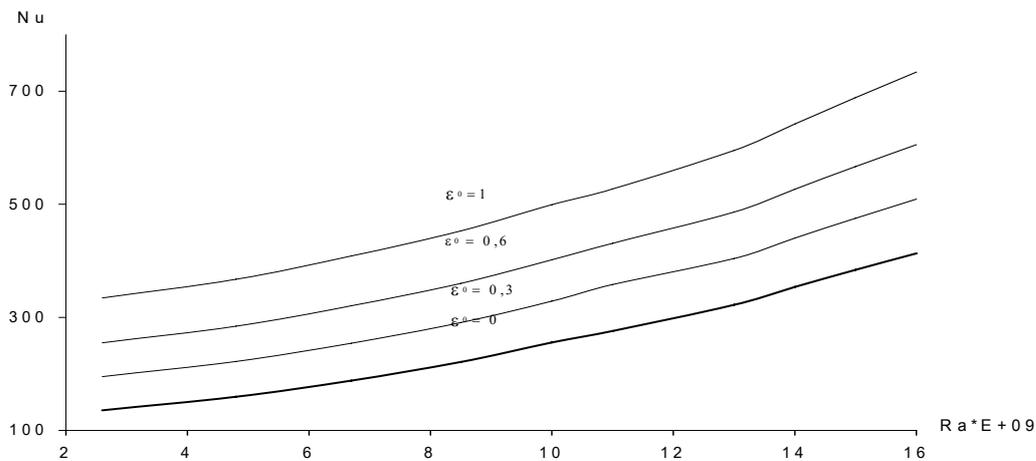
$$\alpha_K = \frac{0,1361\lambda}{F(RaK)^{0,5}} \left[ \sqrt{Pe^2 + 8RaK} - Pe \right]^{0,5} \left[ \sqrt{Pe^2 + 8RaK} + 2Pe \right]^{0,5}.$$

Здесь  $\lambda$ - коэффициент теплопроводности воздуха,  $Вт/м.К$ ;  $F, b$  – соответственно поверхность и ширина стенки трансформатора,  $F=Hb$ ;  $K$  - коэффициент, учитывающий зависимость кинематической вязкости воздуха от температуры;

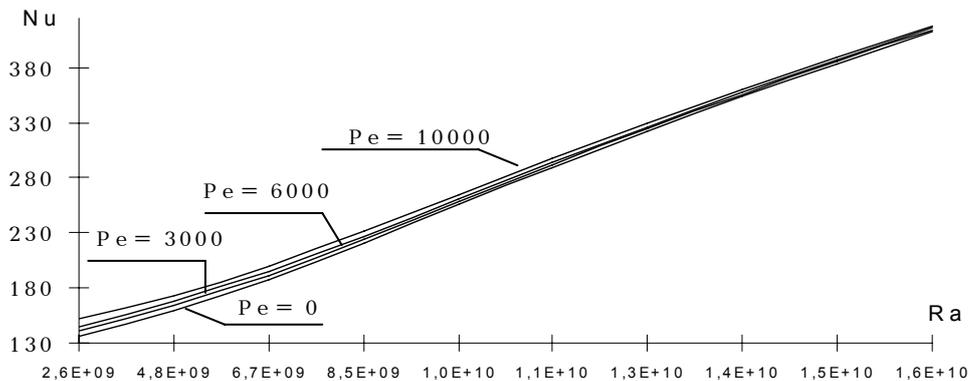
$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_0 C_0 F \left[ \left( \frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  – степень черноты поверхности излучения;  $C_0=5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Используя уравнения (2)-(4), определяем эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0 = Q/H\theta_{\text{ст}}$  и число Нуссельта:  $Nu = \alpha_0 H / \lambda$ .



а)



б)

Рис. 1. Зависимость  $Nu$  от  $Ra$ : а - при  $\varepsilon = 0 \dots 1$  ( $Pe = 0$ ); б - при  $Pe = 10^3 \dots 10^4$  ( $\varepsilon_0 = 0$ )

На рис. 1 а, б представлены кривые  $Nu=f(Ra)$  в зависимости от значений  $\varepsilon_0$  и  $Pe$ . Теоретические исследования для силовых сухих трансформаторов показали, что при  $Ra \leq 10^{10}$ , т.е. при малых значениях температур поверхности, весьма важную роль играет как начальная скорость  $\omega_0$ , так и  $\varepsilon_0$ . При возрастании  $Pe$  от  $10^3$  до  $10^4$  и  $\varepsilon_0$  от 0 до 1  $Nu$  увеличивается примерно на 75%. При  $Ra \geq 10^{10}$  доминирующим параметром является  $\varepsilon_0$ . При возрастании  $\varepsilon_0$  от 0 до 1 число Нуссельта увеличивается примерно на 45%, а изменение числа  $Nu$  от  $Pe$  не существенно.

Используя метод конечных разностей, зависимость  $Nu=f(Ra)$  можно представить выражением

$$Nu = C_0 K_{\vartheta_{ст}} K_{\varepsilon} K_{Pe} (Ra)^n, \quad (5)$$

где  $C_0$  и  $n$  – постоянные, зависящие от режима свободного движения и условий обтекания поверхности [4],  $C_0=0,54$ ,  $n=0,25$ ;  $K_{\vartheta_{ст}} = 1+0,0066\vartheta_{ст}$  – коэффициент, учитывающий изменения физических параметров в зависимости от температуры;  $K_{\varepsilon}=1+0,9\varepsilon_0$  – коэффициент, учитывающий степень черноты излучения поверхности стен;  $K_{Pe}=1+1,2 \cdot 10^{-5} Pe$  – коэффициент, учитывающий дополнительное движение воздуха.

Для проверки полученного выражения было проведено экспериментальное исследование. Установка представляет собой вертикальную полированную, латунную пластину размерами  $30 \times 20 \times 1,5$  см со степенью черноты 0,6. Нагрев пластины проводился путем равномерного пропуска переменного тока по нагревателю, мощность которого изменялась от 0,4 до 45 Вт.

*Таблица*

*Измерения температурного поля установки ( $\omega_0 = 0,46$  м/с;  $Pe = 6000$ )*

№	Q, Вт	$t_{ст}$ , °C	$t_0$ , °C	$t'_{ст}$ , °C	Ra	$Nu_{\vartheta}$	$Nu_p$
1	2,5	23,7	20,6	22,0	$5 \cdot 10^6$	98,14	102,78
2	5,0	26,2	20,6	23,9	$9 \cdot 10^6$	108,6	107,68
3	7,0	29,1	20,6	25,4	$1 \cdot 10^7$	109,9	113,49
4	11	31,9	20,4	26,9	$2 \cdot 10^7$	119,1	119,31
5	15	36,1	20,0	28,4	$2,5 \cdot 10^7$	121,7	128,47
6	17	39,0	20,4	29,0	$3 \cdot 10^7$	116,9	135,09
7	27	46,2	20,2	35,0	$4 \cdot 10^7$	150,2	152,38

Из сопоставления теоретических и экспериментальных данных (см. табл.) следует, что расхождение опытных точек от теоретических составляет не более 2 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. -320 с.
2. **Готтер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин. – М; -Л.: ГЭИ, 1961.- 264 с.
3. **Нерсисян С.Г., Азарян П.Е.** Свободная конвекция и теплообмен вертикальной нагретой стенки трансформаторов в практически "спокойном" пространстве // Изв. АН АрмССР. - 1983.- 1 6. - С.
4. **Краснощеков Е.А., Сукомел А.С.** Задачник по теплопередаче.- М. Энергия, 1979. – 264 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 30.05.1998.

**Ա.Ա. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Ս.Գ. ՆԵՐՏԵՍՅԱՆ, Յու.Ա.ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ**

**ՋԵՐՄԱՓՈԽԱՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՉՈՐ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐՈՒՄ**

Անց է կացվել բնական օդային հովացումով տրանսֆորմատորների ջերմափոխանակման հետազոտություն, հաշվի առնելով մակերևույթի կոնվեկտիվ և ճառագայթային ջերմափոխանակությունը: Կատարված տեսական հետազոտության արդյունքների հիման վրա ստացվել է  $Nu=C_0K_{\text{գալ}}K_{\text{գ}}K_{\text{բե}}(Ra)^n$  վերլուծական արտահայտությունը, որի սխալանքը չի գերազանցում 2%:

**A.A. KIRAKOSSYAN, S.G. NERSESSYAN, Ju.A. HOVHANNISSYAN**

**INVESTIGATION OF THERMOEXCHANGE IN DRY TRANSFORMERS**

An investigation of FCT in dry transformers with allowance of convective and radiation thermoexchange on surfaces is conducted. The analytical expression  $Nu=C_0K_{\text{gw}}K_{\text{g}}K_{\text{pe}}(Ra)^n$  is obtained, the error not exceeding 2 %.