ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXXVI, № 5, 1983 Серия технических наук

ТЕПЛОТЕХНИКА

П. Е. АЗАРЯН, С. Г. НЕРСЕСЯН

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ И ТЕПЛООБМЕН ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРЕТОЙ СТЕНКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРАКТИЧЕСКИ «СПОКОЙНОМ» ПРОСТРАНСТВЕ

Изучение в реальных условиях свободной конвекции вертикальной стенки с учетом зависимости физических параметров от температуры является актуальным вопросом для оптимального проектирования систем охлаждения различных электротехнических, электронных и других устройств.

Изучению теплообмена вертикальной стенки в идеальном состоянии воздушного пространства, где устранены дополнительное движение и завихрения воздуха, посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых заметно отличаются друг от друга. Л. П. Кудряшов, основываясь на приближенном теоретическом решении М. В. Кирпичева, приближенно решил задачу теплообмена в условиях свободного движения жидкости при ламинарном пограничном слое у стенки. В области $5\cdot10^2 \leqslant \mathrm{GrPr} \leqslant 10^{12}$ он теоретически обосновал предположение Михеева М. А. о справедливости обобщения выражения

$$\overline{\mathrm{Nu}} = C(\mathrm{GrPr})^n. \tag{1}$$

Отметим, что исследования вышеуказанных авторов производились при постоянном значении физических параметров жидкости и относятся к поверхностям, которые находились в идеальном «спокойном» воздушном пространстве.

Экспериментальные исследования [1] привели к выводу, что влияние на свободную конвекцию дополнительного движения и завихрения воздуха, имеющегося в реальных условиях, может быть учтено увеличением коэффициента C в общем соотношении (1). Изучая свободную конвекцию цифровым методом [2], авторы пришли к выводу, что если учитываются зависимости физических параметров жидкости от температуры, то это приводит к погрешностям, достигающим 100%.

Рассмотрим свободное гравитационное течение жидкости для вертикальной изотермической (t_c) стенки в практически «спокойном» пространстве, где имеются дополнительное движение и завихрение жидкости. При этом принимается, что вязкость жидкости зависит от температуры:

$$\nu_t = \frac{A\nu_0}{A - 1 + (D + C_3\vartheta)^2}, \qquad (2)$$

где

$$D = 1 + C_3 t_0;$$

для воздуха — $A = 2{,}07661$; $C_3 = -0{,}01654$ *град*$^{-1}$; $\nu_0 = 13{,}75 \cdot 10^{-6}$ $м^2/с$;
для масла марки ТО-35К — $A = 3{,}077$, $C_3 = 0{,}1$ *град*$^{-1}$, $\nu_0 = 120 \cdot 10^{-6}$ $м^2/с$;

$$\vartheta = t - t_0,$$

t, t_0 — температура жидкости в пограничном слое и вдали от него.

Расположим начало координат у нижней кромки стенки, а ось OY — нормально к ее поверхности. Пусть жидкость входит в пограничный слой со скоростью ω_0. Скорость движущегося слоя при этом

$$\omega = \omega_x \bar{y}(1 - \bar{y})^2 + \omega_0, \qquad (3)$$

где $\bar{y} = \frac{y}{\delta}$ — относительная координата; δ — толщина движущего слоя, $м$; ω_x — составляющая скорости по оси.

Температура жидкости в движущемся слое распределяется по закону

$$\vartheta = \vartheta_w (1 - \bar{y})^2, \qquad (4)$$

где

$$\vartheta_w = t_w - t_0.$$

Продольная составляющая скорости ω_x зависит от высоты и определяется из уравнения движения пограничного слоя, которое без учета инерционных сил имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu \frac{\partial \omega}{\partial y}\right) = -\beta g \vartheta, \qquad (5)$$

где β — коэффициент объемного расширения жидкости, *град*$^{-1}$; g — гравитационное ускорение, $м/с^2$.

Умножив обе части уравнения (5) на $1 \cdot d\bar{y}$ и интегрируя в интервале [0, 1], с учетом (3) получим:

$$\omega_x = \frac{\beta g \vartheta_w \delta^2}{3\nu},$$

при этом

$$\omega = \frac{\beta g \vartheta_w \delta^2}{3\nu} \cdot \bar{y}(1 - \bar{y})^2 + \omega_0. \qquad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи (КТО) определяется как

$$\alpha_x = -\frac{\lambda}{\vartheta_w}\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right)_{\bar{y}=0} = \frac{2\lambda}{\delta}, \qquad (7)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, *Вт/м град*.

Из уравнений (4), (6), (7) следует, что ϑ, w и α_x зависят от толщины пограничного слоя δ. Для определения δ используем уравнения Ньютона и Эйлера:

$$C_p \vartheta_{ср} dG = \alpha_x \vartheta_w dx, \tag{8}$$

где средняя температура жидкости:

$$\vartheta_{ср} = \int_0^1 \vartheta d\bar{y} = \frac{\vartheta_w}{3};$$

элементарный расход жидкости в сечении пограничного слоя и средняя интегральная скорость:

$$dG = \bar{a}\,(\rho_0 \cdot w_{ср} \cdot \delta);$$

$$w_{ср} = \int_0^1 w d\bar{y} = \frac{\beta \cdot g \cdot \vartheta_w \cdot \delta^2}{36\nu_{t_0}} \cdot K + w_0;$$

$$K = 1 + \frac{4}{5} \cdot \frac{C_\beta \cdot D \cdot \vartheta_w}{A - 1 + D^2} + \frac{3}{14} \cdot \frac{C_\beta^2 \cdot \vartheta_w^2}{A - 1 + D^2};$$

$$\nu_{t_0} = \frac{A \cdot \nu_0}{A - 1 + D^2};$$

ν_{t_0} — кинематическая вязкость жидкости вдали от пограничного слоя; K — коэффициент, учитывающий изменение вязкости от температуры.

Подставляя соответствующие значения в (8), интегрируя от 0 до δ и обозначая через: $Gr = g \cdot \beta \cdot \vartheta_w \cdot H^3 \cdot \nu_{t_0}^{-2}$ — критерий Грасгофа; $Pr = \nu_{t_0} \cdot a_{t_0}^{-1}$ — критерий Прандтля; $Re = w_0 \cdot H \cdot \nu_{t_0}^{-1}$ — критерий Рейнольдса; $Pe = Re \cdot Pr$ — критерий Пекле; $M = Gr \cdot Pr$ — критерий Релея, и решая относительно δ, получим:

$$\delta = H \sqrt{\frac{12 \cdot Pe}{MK} \left| \sqrt{1 + \frac{2MK}{Pe^2}\bar{x}} - 1 \right|}, \tag{9}$$

где $\bar{x} = \dfrac{x}{H}$ — относительная координата; H — высота стенки, *м*.

Подставляя значения (9) в (7), после преобразования получим местное и среднее числа Нуссельта:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x \cdot H}{\lambda} = \frac{2}{\sqrt{\dfrac{12 \cdot Pe}{M \cdot K} \left| \sqrt{1 + \dfrac{2 \cdot M \cdot K}{Pe^2}\bar{x}} - 1 \right|}};$$

$$\overline{Nu} = \int_0^1 Nu_x d\bar{x} = \frac{0{,}3849}{(M \cdot K)^{0{,}5}} \left| \sqrt{Pe^2 + 2M \cdot K} - Pe \right|^{0{,}5} \times$$

$$\times \left| \sqrt{Pe^2 + 2M \cdot K} + 2Pe \right|. \tag{10}$$

В частном случае, если стенка находится в идеальном «спокойном» пространстве, то скорость жидкости $\omega_n = 0$. Если вязкость не зависит от температуры, то $C_2 = 0$ $(K = 1)$ и, следовательно

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0{,}647\, M^{0,25},$$

что соответствует значению среднего числа Нуссельта, приведенного в [3].

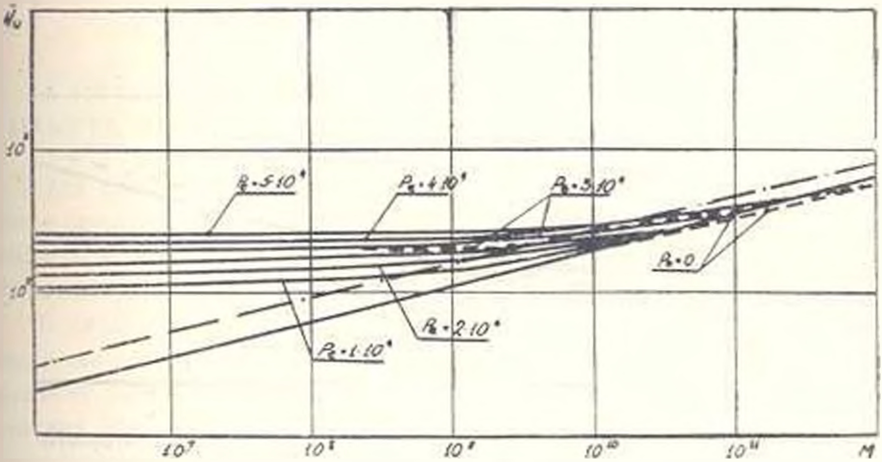

Рис. 1. Функциональная зависимость $\overline{\mathrm{Nu}} = f(M)$ для воздуха, при $Pe = 1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$ и $Pe = 0$; —— $K = 1$; - - - - $K = 0{,}5018$ ($\vartheta_n = 100\,^\circ C$); расчет по формуле [1].

В практически «спокойном» воздушном пространстве $Pe > 0$. При этом, если $10^8 \leqslant M \leqslant 10^{12}$, то число Нуссельта почти не зависит от изменения ν_t (рис. 1) и, следовательно, в первом приближении с погрешностью не более 5% его можно рассчитать по выражению

$$\overline{\mathrm{Nu}} = \frac{0{,}3849}{M^{0,5}} \left| \sqrt{Pe^2 + 2M} - Pe \right|^{0,5} \cdot \left| \sqrt{Pe^2 + 2M} + 2Pe \right|. \quad (11)$$

Причем, если $Pe \geqslant 10^4$ и $10^8 \leqslant M \leqslant 10^{12}$ (рис. 1), то число $\overline{\mathrm{Nu}}$ с погрешностью не более 2% рассчитывается по формуле

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 1{,}02 M^{0,25},$$

что с погрешностью не более 8% совпадает с числом $\overline{\mathrm{Nu}}$, рассчитанным по выражению, приведенному в [1].

В гидравлически замкнутой системе охлаждения «М»-трансформаторов под влиянием гравитационного давления происходят циркуляция и смешивание микрообъемов относительно холодного и горячего масла в системе, где для трансформаторного масла число Pe может изменяться в пределах: $0 < Pe \leqslant 2 \cdot 10^3$. Если $M \geqslant 5 \cdot 10^8$, то из рис. 2 следует, что число $\overline{\mathrm{Nu}}$ только зависит от изменения кинематической вязкости масла ν_t и в первом приближении с погрешностью не более 10% можно рассчитать по формуле

$$\overline{Nu} = 0{,}81\,M^{0,23},$$

а при $M < 5\cdot10^9$ число $\overline{Nu}$ зависит от Pe и рассчитывается по формуле (11).

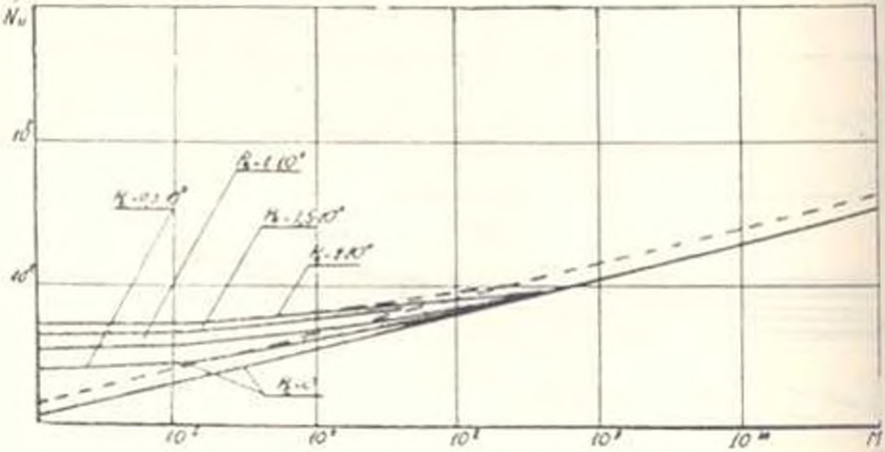

Рис. 2. Функциональная зависимость $\overline{Nu} = f(M)$ для трансформаторного масла при $Pe = 0-2\cdot10^3$; —— $K=1$; - - - - $K=2{,}351$ ($\theta_w = 50^\circ C$).

ПО «Армэлектромаш» 10.XII.1988

Գ. Ե. ԱԶԱՐՅԱՆ, Ս. Գ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

ՈՒՂՂԱՀԱՅԱՑ ՏԱՓ ՊԱՏԻ ՎՐԱ ԱԶԱՏ ԿՈՆՎԵԿՑԻԱՆ ԵՎ ՋԵՐՄԱՓՈԽԱՆՑՈՒՄԸ ԳՈՐԾՆԱԿԱՆՈՐԵՆ «ԽԱՂԱՂ» ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Դիտված է ազատ կոնվեկցիան հարթ ուղղահայաց պատի վրա գործնականորեն «խաղաղ» միջավայրում՝ հաշվի առնելով մածուցիկության կախվածությունը ջերմաստիճանից։ Առաջարկված է Նուսելտի թվի հաշվարկման բանաձև, օգտագործման տիրույթը օդի և տրանսֆորմատորային յուղի համար։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Готтер Г.* Нагревание и охлаждение электрических машин. — М.: Госэнергоиздат, 1961. — 480 с.
2. *Никитенко Н. И.* и др. Исследование течения и теплообмена в каналах трансформаторов с жидкостным охлаждением. — Пром. теплотехника, 1979, т. 1, № 1, с. 33—37.
3. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. — М.: Энергия, 1981. — 418 с.