

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПРОТОЧНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ЖИДКОСТИ МАЛОЙ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ

И.М. Кирпичникова, В.А. Русинов (г. Барнаул, Россия)

Для нагревателя, в котором роль магнитопровода, продуктопровода и нагревательного элемента выполняет змеевик из стальной трубы с плотно прилегающими витками с наложенной на него обмоткой из железной ленты, исходными данными для расчета являются расход жидкости G_V ($\text{м}^3/\text{с}$) и разность температур $\Delta T_{ж}$, на которую она нагревается. По ним определяется полезная мощность нагревателя $P_0 = \rho_1 G_V c \Delta T_{ж}$, где ρ_1 – плотность жидкости, c – ее удельная теплоемкость, а затем по известному значению теплового КПД ($\eta_1 = 0,97 - 0,99$) – его активная $P = P_0/\eta_1$ и полная мощность $S = P/\cos\varphi$, где $\cos\varphi = 0,857$. Здесь же производится выбор внутреннего диаметра трубы. Он должен быть таким, чтобы обеспечивалась оптимальная для теплоотдачи скорость течения жидкости ($v > 0,2$ м/с). Для обеспечения скоростей течения жидкости более 1,5 м/с, требуется использовать дополнительное техническое оборудование, что экономически нецелесообразно. Кроме того, следует учесть, что разность температур, на которую нагревается жидкость $\Delta T_{ж}$, будет изменяться почти вдвое в течение года, от 90 – 95К зимой до 50 – 70К летом, что связано с сезонным изменением температуры жидкости. В проточных нагревателях изменение $\Delta T_{ж}$, возможно не только изменением мощности S , но и изменением скорости v течения жидкости, что позволяет делать конструкцию нагревателя более простой. Внутренний диаметр d трубы должен быть таким, чтобы обеспечивалась возможность регулирования скорости течения жидкости в диапазоне 0,2 – 1,5 м/с. Следовательно, при максимальной $\Delta T_{ж} \approx 90\text{К}$ диапазон скоростей течения жидкости должен быть 0,2 – 0,7 м/с. Определение возможных значений d производится по формуле

$$\frac{v}{S} = \frac{4\eta_T \cos\varphi}{\pi d^2 c \Delta T_{ж}} = \frac{351}{d^2 \Delta T_{ж}}, \quad (1)$$

где d измеряется в мм, или по графикам зависимости $\frac{v}{S} = f(d)$ при различных $\Delta T_{ж}$, построенных на основе формулы (1) и приведенных на рисунке 1.

Выбирается оптимальное значение параметра $x = HU$ (H – напряженность магнит-

ного поля, U – сетевое напряжение), обеспечивающего минимальную металлоемкость по меди ($x = 5500$ кВА/м при $S=10$ кВА, $x = 7700$ кВА/м при $S=20$ кВА и $x = 8800$ кВА/м при $S>20$ кВА). Выбранное значение x используется для определения толщины $\Delta_{0,01}$ и массы $m_{\text{акт}}$ активного слоя ферромагнетика по формулам $\Delta_{0,01} = 0,129 \cdot 10^{-3} x^{0,4167}$ и $y = 17600 x^{1,1667}$, полученным для $U=220$ В. Здесь $y = m_{\text{акт}}/S$ (кг/кВА). Поэтому $m_{\text{акт}} = y S$.

Считая, что образование свищей в трубе в результате коррозии ее внутренней стенки возникает при уменьшении толщины трубы в среднем вдвое, находим массу железа m_{Fe} . Для этого определяется площадь поперечного сечения активного слоя $S_{\perp \text{акт}}$ и длина трубы $l_{\text{тр}}$ по формулам $S_{\perp \text{акт}} = \pi \Delta_{0,01} (d + \Delta_{0,01} + \delta/2)$; $l_{\text{тр}} = m_{\text{акт}}/\rho_{\text{Fe}} S_{\perp \text{акт}}$, где d – одно из выбранных значений внутреннего диаметра трубы, δ – толщина стенок трубы, ρ_{Fe} – плотность железа. Длина трубы может быть определена и по

графику зависимости $\frac{l_{\text{мп}}}{S} = f(x)$ при раз-

личных значениях d , полученному на основе приведенных выше соотношений (рисунок 2). Полученное значение $l_{\text{тр}}$ сравнивается с минимальным значением этой величины, при которой достигается предельная разность температур $\Delta T_{\text{с-ж}}$ стенки трубы и прилегающей к ней жидкости. Примем $\Delta T_{\text{с-ж}} = 20\text{К}$. Тогда, исходя из эмпирического соотношения для критерия Нуссельта при турбулентном течении жидкости, приведенного в работе [1], $\langle Nu_{\text{жкд}} \rangle = 0,021 Re_{\text{жкд}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,43} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25} \langle \varepsilon \rangle_1$, где $Re_{\text{жкд}}$ – число Рейнольдса, Pr – критерий Прандтля, $\langle \varepsilon \rangle_1$ – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы, можно получить, что

$$\frac{l_{\text{мин}}}{S} = \frac{1,353}{v^{0,8} d^{0,8}}, \quad (2)$$

где $l_{\text{мин}}$ в м, S в кВА, v в м/с, d в мм. Здесь учтено, что при средней температуре воды равной 50°C коэффициент ее кинематической вязкости $\nu = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,647 \text{Вт/мК}$, критерий Прандтля $Pr_{\text{ж}} = 3,54$, а также то, что в диапазоне температур от 0 до 50°C отношение $(Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25}$ удовлетворительно описывается зависимостью: $(Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25} = 1 + 3,8 \cdot 10^{-3} \Delta t$.

Если полученное значение $l_{тр} < l_{min}$, то выбирают меньшее значение d и для него снова вычисляется $l_{тр}$, которая сравнивается с l_{min} , определенной по формуле (2). И так до тех пор, пока при выбранном значении d длина трубы $l_{тр}$ не будет больше ее минимального значения l_{min} . Для такого выбора подходящего внутреннего диаметра трубы можно использовать также полученный на основе (2) график зависимости $\frac{l_{min}}{S} = f(\nu)$ при различных значениях d (рисунок 3). Тогда $m_{Fe} = (\Delta_{0,01} + \delta/2)(\Delta_{0,01} + d + \delta/2) m_{акт}/\Delta_{0,01}(\Delta_{0,01} + d + \delta)$. По

известной длине трубы находится число ее витков $N_{тр} = l_{тр}/\pi D$. Для этого диаметр тороида D выбирается в диапазоне 25 – 50 см таким, чтобы число витков трубы было целым. Тогда магнитное сопротивление во всех сечениях тороида будет одинаковым.

Далее определяется толщина слоев железной ленты $\Delta_n = \Delta_{0,01} - \delta/2$ и число этих слоев $k_n = \Delta_n/d_n$, где d_n – толщина слоя ленты. Так как средняя длина витка ленты $\langle l \rangle_n = \pi(d_0 + 2\delta + k_n d_n) N_{тр}$, то ее длина при ширине ленты a и перекрытии витков на 3 мм будет равна $l_n = \pi D k_n \langle l \rangle_n / (a - 3)$.

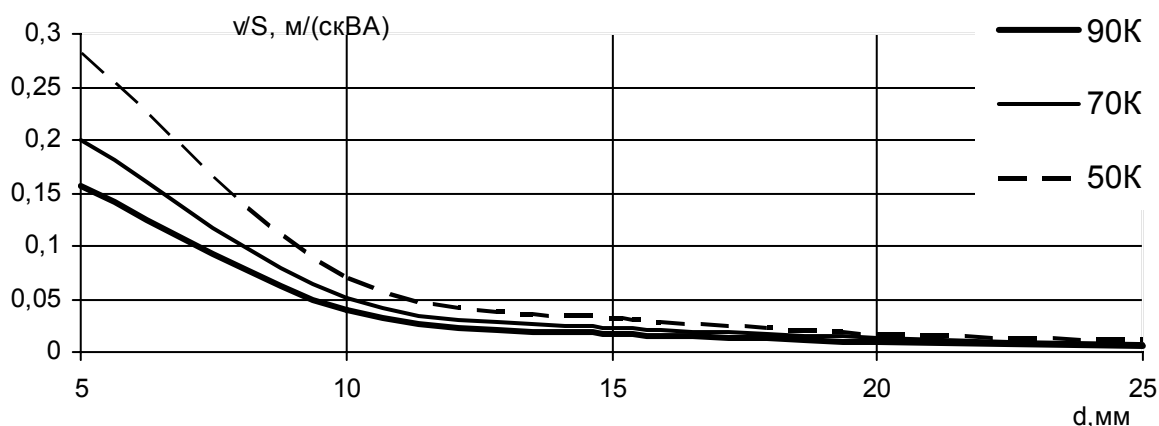


Рисунок 1 – Зависимость скорости течения жидкости v/S (м/с кВА) от внутреннего диаметра трубы при разности температур, на которую нагревается вода 50, 70 и 90К

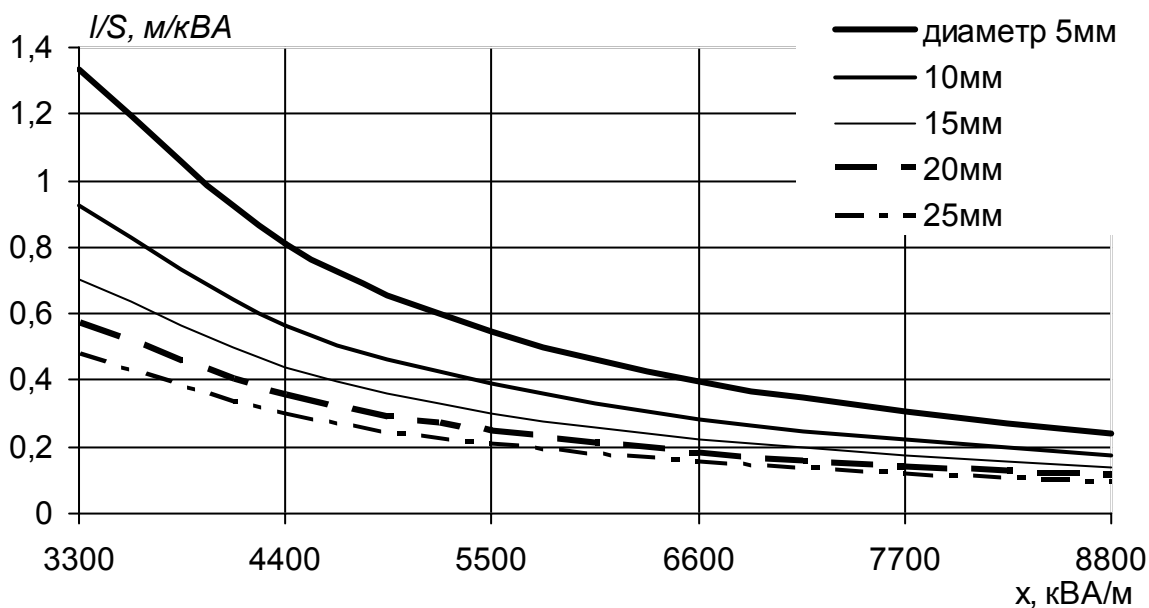


Рисунок 2 – Зависимость длины трубы от параметра x при различных значениях ее внутреннего диаметра

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПРОТОЧНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ
ЖИДКОСТИ МАЛОЙ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ

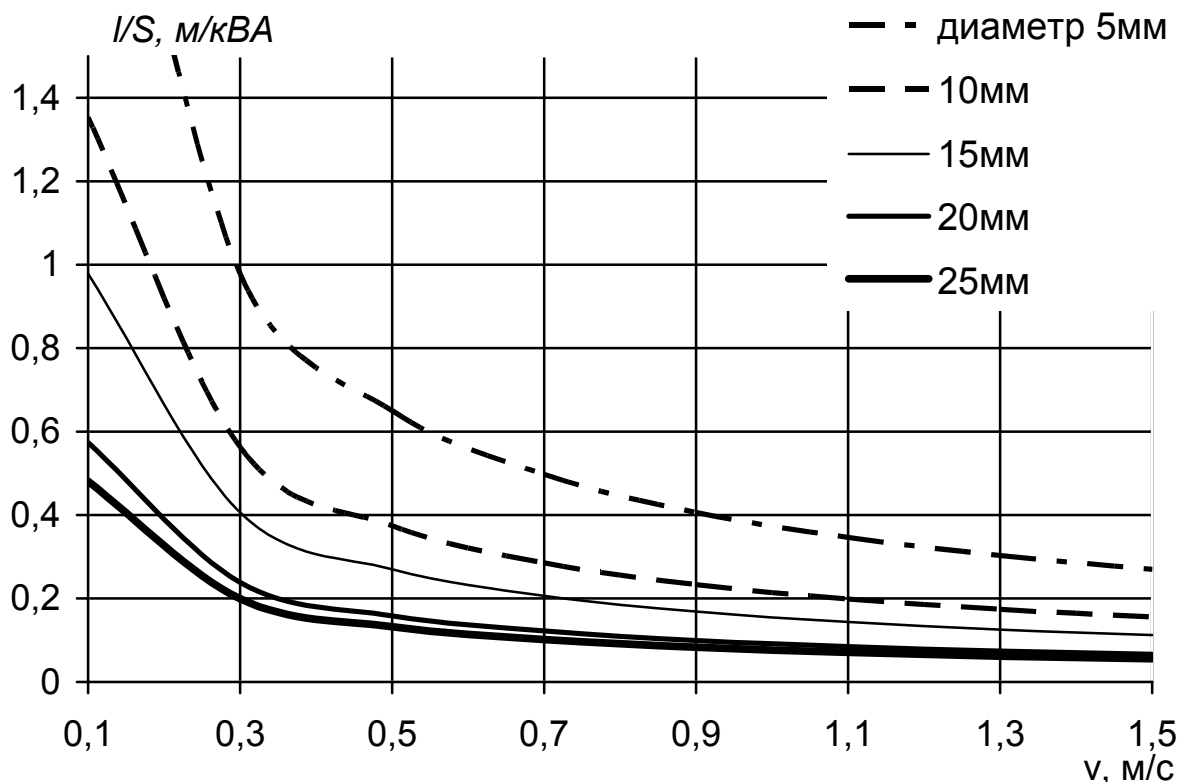


Рисунок 3 – Зависимость минимальной длины трубы (при $\Delta t_{сж}=20\text{K}$) от скорости течения жидкости при различных значениях внутреннего диаметра трубы

По известной полной мощности S и напряжению в сети U , принимая допустимую плотность тока в меди $j = 3\text{A}/\text{мм}^2$ определяем площадь поперечного сечения S_{\perp} и диаметр d провода: $S_{\perp} = S / U j$; $d = (4 S_{\perp} / \pi)^{0,5}$. Так как средняя длина витка провода $\langle l \rangle = \pi(d_0 + 2\Delta + k d) + 2(N_{тр} - 1)(d_0 + 2\delta)$, а число слоев обмотки k и число витков на единицу длины тороида n соответственно равны $k = nd$; $n = x/S$, то длина провода l будет равна $l = \langle l \rangle n \pi D$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев М.А. Теплоотдача при турбулентном движении жидкости в трубах // Изв. АН СССР, ОТН. – 1952. – №10. – С. 1448 - 1455.