

$$\frac{\tau}{\tau_{\Pi}} < 1, \quad \theta_{C.Д} = \theta_{C.Н} + \frac{\int_0^{\tau_H} I^2 R dt}{C_P M} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\Pi}}; \quad (5)$$

$$\frac{\tau}{\tau_{\Pi}} \geq 1, \quad \theta_{C.Д} = \theta_{C.Н} + \frac{\int_0^{\tau_H} I^2 R dt}{C_P M}, \quad (6)$$

где $\theta_{C.Д}$ — температура обрабатываемой среды у дна емкости, °С; S_{EMK} — площадь поперечного сечения емкости; M — масса обрабатываемой среды, кг; τ_H — время нагрева среды, с; Π — ширина электродов электронагревателя, м; I — мгновенное значение полного тока электронагревателя, А; R — мгновенное значение полного сопротивления электронагревателя, Ом.

Отношение времени с момента включения ЭЭН к времени начала установившегося движения среды определяет степень перемешивания нагретой в ЭЭН среды с нагреваемой средой в емкости. Когда это отношение равно или больше единицы, то движение среды в емкости устанавливается по всему объему и можно считать, что выделяемая при нагреве мощность также равномерно распределяется по всему объему нагреваемой среды. Введенные допущения и коэффициент перемешивания позволяют моделировать процесс нагрева емкостным ЭЭН с плоскопараллельной зонированной электродной системой с точностью 10-15%. Такой точности достаточно для практической реализации моделируемых ЭЭН.

Математическое моделирование процесса теплообмена проточных ЭЗУ с термозависимыми поверхностно-распределенными электронагревателями при свободной конвекции обрабатываемой среды

Прищепов М. А., канд. техн. наук, доцент, Власенко А. П., БГАТУ, г. Минск

В наиболее общем случае проточная электронагревательная установка (ЭЗУ) с поверхностно-распределенным электронагревателем (ПЭН) представляет собой сложную конструкцию, перенос теплоты в которой от тепловыделяющего элемента к нагреваемой среде сопровождается различными механизмами теплопередачи: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Кроме того, процесс переноса теплоты может оказывать влияние на процесс ее выделения. Это происходит в том случае, если в ПЭН используется резистивное токопроводящее покрытие (РТП) с термозависимым удельным сопротивлением.

Следовательно, для расчета электротепловых характеристик таких прочных ЭНУ необходимо решать сопряженную задачу с учетом свободной конвекции, лучистого теплообмена и распределения потенциала электрического поля, что вызывает значительные трудности, обусловленные необходимостью решения системы интегро-дифференциальных уравнений в частных производных (электрического поля, теплопроводности, энергии, движения и неразрывности):

$$c\rho\delta \frac{\partial t}{\partial \tau} = \delta\lambda_{\Sigma} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + q_F(x,t) - \alpha_C(x,t) \cdot (t - t_C) - \alpha_B \cdot (t - t_0) - \alpha_{ЛД} \varphi_{ЛД} \cdot (t - \bar{t}); \quad (1)$$

$$q_F = j \cdot E; \quad (2)$$

$$E = \frac{U \cdot \rho_{II}(x,t)}{l}; \quad (3)$$

$$j = \frac{U}{l \int_0^l \rho_{II}(x,t) dx}; \quad (4)$$

$$c_C G \frac{\partial t_C}{\partial x} + c_C \rho_C F \frac{\partial t_C}{\partial t} = \alpha_C(x,t) \cdot p \cdot (t - t_C); \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_C}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_C w)}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial x} = g \frac{1}{\rho_C} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\rho_C = \rho_0 \cdot [1 - \beta \cdot (t_C - t_0)]; \quad (8)$$

$$\alpha_C(x,t) = f(Gr, Pr, x, t). \quad (9)$$

где $c\rho$ - эквивалентное произведение теплоемкости и плотности корпусно-изоляционных слоев ПЭН, Дж/(м³·°C); $\alpha_C(x,t)$ - зависимость изменения коэффициента теплоотдачи по длине ПЭН, Вт/(м²·°C); α_B - суммарный коэффициент теплоотдачи в воздух, Вт/(м²·°C); $\alpha_{ЛД}$ - коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·°C); λ_{Σ} - эквивалентная теплопроводность корпусно-изоляционных слоев ПЭН, Вт/(м·°C); τ - общая толщина ПЭН,

t – температура ПЭН, °С; ρ_{II} – удельное поверхностное сопротивление РТП, ом/квдрат; J – поверхностная плотность тока А/м; E – напряженность электрического поля, В/м; q_F – плотность теплового потока РТП ПЭН, Вт/м²; P – периметр проточного ПЭН, м; G – массовый расход среды, кг/с; w – скорость движения обрабатываемой среды, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ_{II} – коэффициент взаимоблужения пластин; ρ_0, ρ_c – плотность обрабатываемой среды при температуре t_0 и t_c соответственно, кг/м³; H – высота пластин проточного аппарата, м; β – температурный коэффициент объемного расширения; °С⁻¹; p_d – потери давления на преодоление сопротивлений движению жидкости в проточном ПЭН:

$$p_d = \frac{\xi_{TP} + \xi_M}{2} \rho_c w^2, \quad H / \text{м}^2; \quad \xi_{TP} = 48 \cdot H / (\text{Re}_B \cdot B) - \text{коэффициент}$$

потери напора на трение по длине нагревателя; ξ_M – коэффициент местных сопротивлений в проточном ПЭН; B – ширина канала проточного ПЭН, м; c_c – теплоемкость обрабатываемой среды Дж/(кг·°С); x – текущая координата нагревателя, м; Re , Gr , Pr – критерий Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля.

Краевые условия для системы уравнений проточного ПЭН при свободной конвекции (1) – (9) следующие:

При $x=0$ $t(0, \tau) = t_0$;

$$\lambda_{\text{Э}} \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 \cdot [t_1(0, \tau) - t_0] + \alpha_{C1} \cdot [t_1(0, \tau) - t_0]; \quad (10)$$

$$t_C(0, \tau) = t_0; \quad \rho_C(0, \tau) = \rho_0; \quad (11)$$

$x=H$;

$$-\lambda_{\text{Э}} \frac{dt(H, \tau)}{dx} = \alpha_H \cdot [t_H(0, \tau) - t_0] + \alpha_{CH} \cdot [t_H(0, \tau) - t_{CH}]; \quad (12)$$

при $\tau = 0$

$$t(x, 0) = t_0; \quad t_C(x, 0) = t_0; \quad w(x, 0) = 0; \quad \rho_C(x, 0) = \rho_0. \quad (13)$$

Решение системы интегро-дифференциальных уравнений проводилось методом конечных разностей, при этом аппроксимация исходных уравнений имела неявную конечно-разностную схему.

Математическая система MATLAB

Киселев Б. М., канд. техн. наук, доцент, **Севернева Е. В.**, **Жалобкевич Н. М.**, БГАТУ, г. Минск

Использование вычислительной техники при решении научно-технических задач идет по многим направлениям: от использования уни-