

УДК 539.3

Г.А. Старушенко, Б.Е. Рогоза

ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ КОМПОЗИТОВ. ЧАСТЬ II

2. Использование трехфазной модели в теории осреднения

Рассмотрим двухфазный микroneоднородный материал, состоящий из непрерывной матрицы и периодически расположенных в ней цилиндрических включений квадратного профиля. Будем предполагать, что структура двоякопериодична с периодом, одинаковым в обоих направлениях, и включения расположены по квадратной сетке (рис. 2.1).

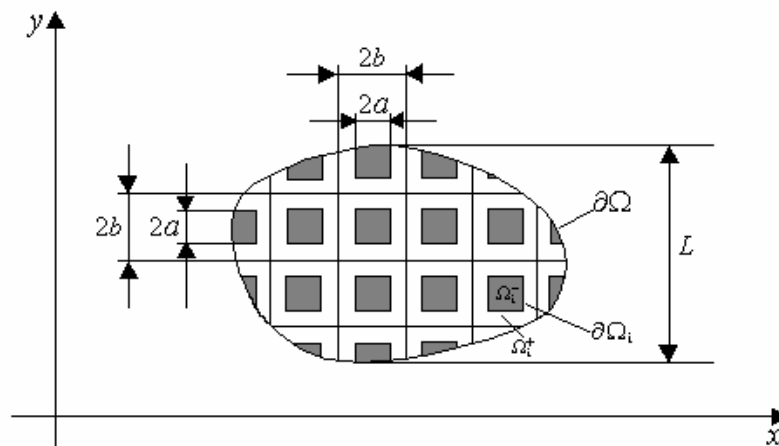


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение композита с цилиндрическими включениями

При исследовании теплопроводности такой структуры определяющими соотношениями является неоднородное уравнение Лапласа с соответствующими условиями сопряжения на границах раздела фаз и граничными условиями на внешнем контуре всего композита:

$$\lambda^+ \Delta u^+ = F \text{ в } \Omega_i^+; \quad \lambda^- u^- = F \text{ в } \Omega_i^-; \quad (2.1)$$

$$u^+ = u^- \text{ на } \partial\Omega_i; \quad \lambda^+ \frac{\partial u^+}{\partial n} = \lambda^- \frac{\partial u^-}{\partial n} \text{ на } \partial\Omega_i, \quad (2.2)$$

где u^+ , u^- – функции распределения температуры соответственно в матрице Ω_i^+ и включениях Ω_i^- ; F^+ , F^- – соответствующая плотность тепловых источников; n – внешняя нормаль к контуру включения.

Применение метода осреднения [13] позволяет свести исходную задачу (2.1)-(2.2) к рассмотрению задачи в характерной структурной единице композита – ячейке (рис. 2.2).

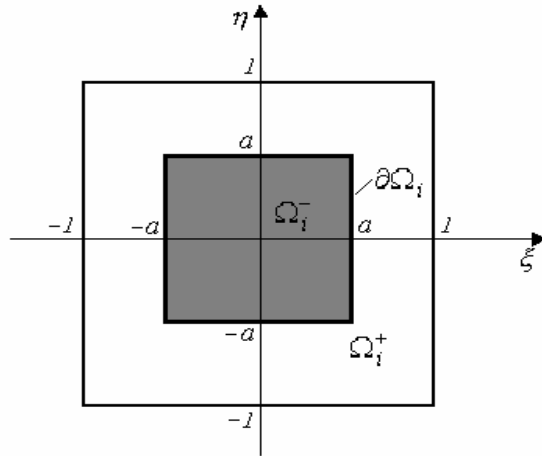


Рисунок 2.2 – Характерная структурная ячейка композитного массива

Тогда в «быстрых» переменных ξ, η «задача на ячейке», или локальная задача, записывается следующим образом [5]:

$$\frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \Omega_i^+; \quad \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \Omega_i^-; \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} u_1^+ &= u_1^-; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} - \lambda \frac{\partial u_1^-}{\partial \xi} = (\lambda - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \xi} \text{ при } \xi = \pm a \\ u_1^+ &= u_1^-; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} - \lambda \frac{\partial u_1^-}{\partial \eta} = (\lambda - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \eta} \text{ при } \eta = \pm a \end{aligned} \quad ; \quad (2.4)$$

$$u_1^+ \Big|_{\xi=1} = u_1^+ \Big|_{\xi=-1}; \quad u_1^+ \Big|_{\eta=1} = u_1^+ \Big|_{\eta=-1}; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} = \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} \Big|_{\xi=-1}; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} \Big|_{\eta=-1}. \quad (2.5)$$

Используем для решения локальной задачи (2.3)-(2.5) трехфазную модель композитной структуры.

С физической точки зрения это означает следующее: все, кроме одной, ячейки композита, заменим эквивалентной гомогенной средой $\tilde{\Omega}$, имеющей неизвестный (искомый) приведенный коэффициент теплопроводности $\tilde{\lambda}$. Таким образом, приходим к задаче для двухфазного включения в бесконечной области (рис. 2.3).

С математической точки зрения такая идеализация приведет, во-первых, к замене условий периодичности (2.5) условиями гладкого сопряжения матрицы с эквивалентной однородной средой; и во-вторых, к условиям затухания функции распределения температуры и теплового потока в осредненной среде при значительном удалении от включения.

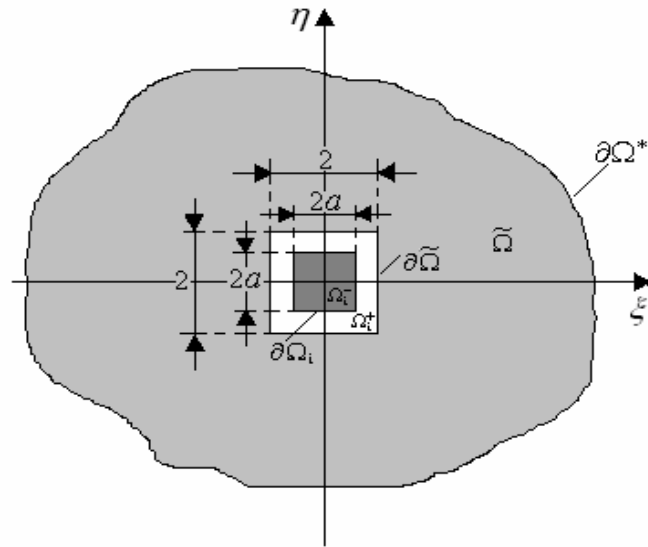


Рисунок 2.3 – Трехфазная модель ячейки с квадратным включением

Выражение для функции распределения температуры $\tilde{u}$ в осредненной области $\tilde{\Omega}$ представим в виде следующего асимптотического ряда по степеням малого параметра ε :

$$\tilde{u} = \tilde{u}_0(x, y) + \varepsilon \tilde{u}_1(x, y, \xi, \eta) + \varepsilon^2 \tilde{u}_2(x, y, \xi, \eta) + \dots \quad (2.6)$$

Следовательно, задача на ячейке (2.3)-(2.5) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \Omega_i^+; \quad \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \Omega_i^-; \quad \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \tilde{\Omega}_i; \quad (2.7)$$

$$u_1^+ = u_1^-; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} - \lambda \frac{\partial u_1^-}{\partial \xi} = (\lambda - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \xi} \text{ при } \xi = \pm a; \quad (2.8)$$

$$u_1^+ = u_1^-; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} - \lambda \frac{\partial u_1^-}{\partial \eta} = (\lambda - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \eta} \text{ при } \eta = \pm a$$

$$u_1^+ = \tilde{u}_1; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} - \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \xi} = (\tilde{\lambda} - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \xi} \text{ при } \xi = \pm 1; \quad (2.9)$$

$$u_1^+ = \tilde{u}_1; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} - \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \eta} = (\tilde{\lambda} - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \eta} \text{ при } \eta = \pm 1$$

$$\tilde{u}_1 \rightarrow 0; \quad \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \xi} \rightarrow 0 \text{ при } \xi \rightarrow \pm\infty; \quad \tilde{u}_1 \rightarrow 0; \quad \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \eta} \rightarrow 0 \text{ при } \eta \rightarrow \pm\infty. \quad (2.10)$$

Для решения локальной задачи (2.7)-(2.10) используем метод возмущения формы границы [2, 4], в соответствии с которым контуры включения $\partial\Omega_i$ и ячейки $\partial\tilde{\Omega}$ в полярной системе координат r, θ описываются уравнениями вида:

$$r = r_0 + \varepsilon_1 f(\theta), \quad (2.11)$$

где $r_0 = \text{const} > 0$; $f(\theta)$ – дифференцируемая функция, характеризующая геометрическую форму рассматриваемого контура; ε_1 – малый параметр ($|\varepsilon_1| \ll 1$).

В данном случае соотношение (2.11) применительно к контурам $\partial\Omega_i$ и $\partial\tilde{\Omega}$ представим соответственно следующим образом:

$$r^- = r_0^-(1 + \varepsilon_1 \cos 4\theta + \dots); \quad r^+ = r_0^+(1 + \varepsilon_1 \cos 4\theta + \dots). \quad (2.12)$$

Математический смысл этой аппроксимации заключается в том, что в первом приближения квадратные контуры включения и матрицы (ячейки) заменяются на окружности. При этом радиусы соответствующих окружностей r_0^- , r_0^+ выбираются таким образом, чтобы сохранялось равенство площадей исходной и преобразованной областей матрицы и включения (рис. 2.4):

$$\pi(r_0^-)^2 = 4a^2; \quad \pi(r_0^+)^2 = 4, \quad \text{т. е.} \quad r_0^- = 2a/\sqrt{\pi}; \quad r_0^+ = 2/\sqrt{\pi}. \quad (2.13)$$

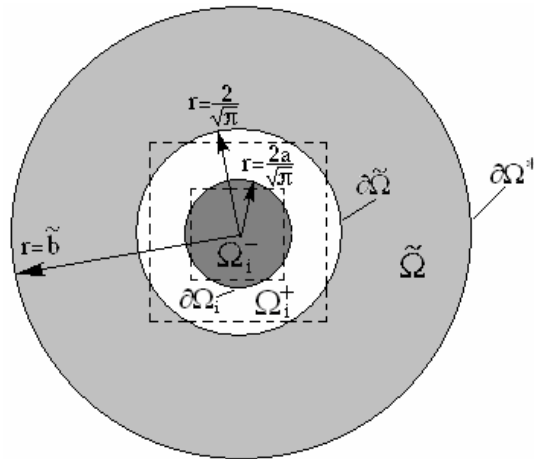


Рисунок 2.4 – Расчетная модель трехфазной структуры

Значение малого параметра ε_1 для квадратного контура, как правило, изменяется в пределах [4]: $1/6 \leq |\varepsilon_1| \leq 1/9$. В данном случае в качестве ε_1 взята величина:

$$\varepsilon_1 = \frac{1 - 2/\sqrt{\pi}}{1} = \frac{a - 2a/\sqrt{\pi}}{a} = 1 - 2/\sqrt{\pi} \approx -0,13.$$

Получим решение задачи на ячейке в нулевом приближении, расчетная геометрическая модель для которого приведена на рис. 2.4.

С учетом соотношений (2.11)-(2.13) локальная задача (2.7)-(2.10) в быстрых полярных координатах r, θ запишется следующим образом:

$$\frac{\partial^2 u_1^+}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_1^+}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \theta^2} = 0 \text{ в } \Omega_1^+; \quad \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_1^-}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \theta^2} = 0 \text{ в } \Omega_1^-; \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial \theta^2} = 0 \text{ в } \tilde{\Omega};$$

$$u_1^+ = u_1^-; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial r} - \lambda \frac{\partial u_1^-}{\partial r} = (\lambda - 1) \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial u_0}{\partial y} \sin \theta \right) \text{ при } r = \frac{2a}{\sqrt{\pi}}; \quad (2.15)$$

$$u_1^+ = \tilde{u}_1; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial r} - \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial r} = (\tilde{\lambda} - 1) \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial u_0}{\partial y} \sin \theta \right) \text{ при } r = \frac{2}{\sqrt{\pi}}; \quad (2.16)$$

$$\tilde{u}_1 \rightarrow 0; \quad \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial r} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (2.17)$$

Решение граничной задачи (2.14)-(2.17) будем искать в виде:

$$u_1^- = A_1 r \cos \theta + A_2 r \sin \theta; \quad u_1^+ = \left(B_1 r + \frac{C_1}{r} \right) \cos \theta + \left(B_2 r + \frac{C_2}{r} \right) \sin \theta; \quad (2.18)$$

$$\tilde{u}_1 = \frac{D_1}{r} \cos \theta + \frac{D_2}{r} \sin \theta,$$

где $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2$ – произвольные постоянные.

Отметим, что в выражениях (2.18) представление функции u_1^- записано с учетом ограниченности функции распределения температуры и ее производной $\frac{\partial u^-}{\partial r}$ (теплового потока в радиальном направлении) при $r=0$, а выражение для функции $\tilde{u}_1$ удовлетворяет условиям затухания этих характеристик при $r \rightarrow \infty$ (2.17).

В соотношения (2.18) входят восемь произвольных постоянных – по четыре при каждой из базисных функций $\cos \theta$ и $\sin \theta$ (соответственно A_1, B_1, C_1, D_1 и A_2, B_2, C_2, D_2), которые определяются из условий сопряжения (2.15)-(2.16). Системы уравнений для нахождения констант интегрирования A_1, B_1, C_1, D_1 и A_2, B_2, C_2, D_2 полностью идентичны, поэтому приведем решение лишь одной из них:

$$A_1 = -\left(1 + 4\tilde{\lambda}\Delta_1\right) \frac{\partial u_0}{\partial x}; \quad B_1 = -\left(1 + 2(\lambda + 1)\tilde{\lambda}\Delta_1\right) \frac{\partial u_0}{\partial x};$$

$$C_1 = \frac{8}{\pi} a^2 (\lambda - 1) \tilde{\lambda} \Delta_1 \frac{\partial u_0}{\partial x}; \quad D_1 = \frac{4}{\pi} \left(1 + 2(a^2(\lambda - 1) + \lambda + 1)\Delta_1\right) \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad (2.19)$$

где $\Delta_1 = ((\tilde{\lambda} - 1)(\lambda - 1)a^2 - (\tilde{\lambda} + 1)(\lambda + 1))^{-1}$.

Очевидно, что для произвольных постоянных A_2, B_2, C_2, D_2 имеем:

$$A_2 = A_1; \quad B_2 = B_1; \quad C_2 = C_1; \quad D_2 = D_1 \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial u_0}{\partial y} \right). \quad (2.20)$$

Дальнейшее решение задачи сводится к построению осредненных соотношений. Однако в данном случае следует принять во внимание, что осреднение должно производиться по всей трехфазной области $\Omega^* = \Omega_i^+ \cup \Omega_i^- \cup \tilde{\Omega}$ – матрице, включению, осредненной среде. Таким образом, уравнение, которое необходимо осреднить, имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u_0^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0^+}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial x \partial \xi} + 2 \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial y \partial \eta} + \frac{\partial^2 u_2^+}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_2^+}{\partial \eta^2} + \lambda \left(\frac{\partial^2 u_0^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0^-}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial x \partial \xi} + \right. \\ & \left. + 2 \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial y \partial \eta} + \frac{\partial^2 u_2^-}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_2^-}{\partial \eta^2} \right) + \tilde{\lambda} \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_0}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial x \partial \xi} + 2 \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial y \partial \eta} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_2}{\partial \eta^2} \right) = f \end{aligned} \quad (2.21)$$

Оператор осреднения [13] обобщается в данном случае таким образом:

$$(\tilde{\dots}) = \frac{1}{|\Omega^*|} \left(\iint_{\Omega_i^+} (\dots) d\xi d\eta + \lambda \iint_{\Omega_i^-} (\dots) d\xi d\eta + \tilde{\lambda} \iint_{\tilde{\Omega}} (\dots) d\xi d\eta \right), \quad (2.22)$$

где $|\Omega^*| = |\Omega_i^+ \cup \Omega_i^- \cup \tilde{\Omega}|$ – мера трехфазной области, границу которой формально можно считать окружностью бесконечно большого радиуса $\tilde{b} \rightarrow \infty$.

Применяя оператор осреднения (2.22) к соотношению (2.21), получаем осредненное уравнение в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{|\Omega^*|} \left[\iint_{\Omega_i^+} \left(\frac{\partial^2 u_0^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0^+}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial x \partial \xi} + \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial y \partial \eta} \right) d\xi d\eta + \int_{\partial\Omega_i^+} \left(\frac{\partial u_2^+}{\partial \bar{n}} + \frac{\partial u_1^+}{\partial n} \right) dl + \int_{\partial\tilde{\Omega}} \left(\frac{\partial u_2^+}{\partial \bar{n}} + \frac{\partial u_1^+}{\partial n} \right) dl + \right. \\ & \left. + \lambda \iint_{\Omega_i^-} \left(\frac{\partial^2 u_0^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0^-}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial x \partial \xi} + \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial y \partial \eta} \right) d\xi d\eta + \int_{\partial\Omega_i^-} \left(\frac{\partial u_2^-}{\partial \bar{n}} + \frac{\partial u_1^-}{\partial n} \right) dl + \right. \\ & \left. + \tilde{\lambda} \iint_{\tilde{\Omega}} \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial x \partial \xi} + \frac{\partial^2 \tilde{u}_1}{\partial y \partial \eta} \right) d\xi d\eta + \int_{\partial\tilde{\Omega}} \left(\frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial \bar{n}} + \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial n} \right) dl + \tilde{\lambda} \int_{\partial\tilde{\Omega}^*} \left(\frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial \bar{n}} + \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial n} \right) dl \right] = f. \end{aligned} \quad (2.23)$$

С учетом выражений для u_1^+ , u_1^- , $\tilde{u}_1$ (2.18) осредненное уравнение (2.23) преобразуется к виду:

$$\frac{1}{|\Omega^*|} \left[|\Omega_i^+| (B+1) + \lambda |\Omega_i^-| (A+1) + \tilde{\lambda} |\tilde{\Omega}| \right] \Delta u_0 = f, \quad (2.24)$$

где q – приведенный параметр:

$$q = \frac{1}{|\Omega^*|} \left[|\Omega_i^+| (B+1) + \lambda |\Omega_i^-| (A+1) + \tilde{\lambda} |\tilde{\Omega}| \right]; \quad (2.25)$$

$$A = \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \right)^{-1} A_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)^{-1} A_2; \quad B = \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \right)^{-1} B_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)^{-1} B_2.$$

Очевидно, что коэффициент q , определяемый выражением (2.25), является искомым осредненным коэффициентом теплопроводности, т. е. именно тем приведенным параметром $\tilde{\lambda}$, который использовался в трехфазной модели для описания эквивалентной гомогенной среды $\tilde{\Omega}$. Следовательно, приравняв $\tilde{\lambda}$ выражению (2.25), приходим к линейному алгебраическому уравнению относительно искомого коэффициента $q = \tilde{\lambda}$, решая которое, находим точное аналитическое выражение для эффективного коэффициента теплопроводности:

$$q = \tilde{\lambda} = \frac{1 - a^2 + \lambda(1 + a^2)}{1 + a^2 + \lambda(1 - a^2)}. \quad (2.26)$$

3. Асимптотические соотношения и анализ решения на основе трехфазной модели

Прежде чем перейти к асимптотическому анализу полученного для эффективного коэффициента теплопроводности выражения (2.26), отметим принципиальный факт. Как известно, в силу теоремы Келлера [11], приведенные параметры теплопроводности композитов с включениями проводимости λ , симметричными в ячейке относительно прямой $\eta = \xi$, связаны соотношением:

$$q(\lambda) = \frac{1}{q(1/\lambda)}. \quad (3.1)$$

Выражение (2.26), очевидно, точно (а не асимптотически!) удовлетворяет теореме Келлера для всех значений проводимости вставок λ , включая предельные случаи $\lambda \rightarrow 0$ и $\lambda \rightarrow \infty$.

Далее проанализируем полученное для осредненного коэффициента теплопроводности выражение (2.26) и выведем из него все возможные асимптотики в предельных случаях значений геометрического параметра композита – размера включения a и его физической характеристики – теплопроводности вставок λ .

1. $a \rightarrow 0$ – размеры включений малы, в пределе – однородный материал с проводимостью матрицы. При любом значении проводимости включений λ имеем: $q = 1$.

2. $a \rightarrow 1$ – большие размеры включений, в пределе – однородная структура, проводимость которой равна проводимости вставок. При любых значениях λ получаем: $q = \lambda$.

3. $\lambda \rightarrow 1$ – коэффициенты теплопроводности матрицы и вставок одного порядка, в пределе – однородная структура (матрица). При всех значениях a находим: $q=1$.

4. $\lambda \rightarrow 0$ – включения малой проводимости, в пределе – композит со вставками-теплоизоляторами:

$$q = (1 - a^2) / (1 + a^2). \quad (3.2)$$

В частности, из (3.2) могут быть получены асимптотики для включений малой проводимости по их геометрическому размеру.

4.1. $a \ll 1$ – размеры включений малы. Раскладывая соотношение (3.2) в ряд по степеням малого параметра a , находим: $q = 1 - 2a^2$.

Для сравнения, прямое осреднение (осреднение по Фойгту), которое, как известно [7], дает оценку сверху приведенного коэффициента, в данном случае представляется соотношением: $\bar{q} = 1 - a^2$.

4.2. $a \rightarrow 1$, т. е. в случае, когда размеры включений-теплоизоляторов предельно большие, из (3.2) имеем соотношение

$$q = 1 - a, \quad (3.3)$$

которое совпадает с известным результатом [1], полученным как решение соответствующей задачи механики для стержневой системы.

5. $\lambda \rightarrow \infty$ – включения большой проводимости, в пределе – композит с абсолютно проводящими вставками:

$$q = (1 + a^2) / (1 - a^2). \quad (3.4)$$

Аналогично, как и в случае включений малой проводимости, получим из выражения (3.4) различные асимптотики по размеру вставок.

5.1. $a \ll 1$ – малые включения. Асимптотическое разложение выражения (3.4) в ряд по степеням малого параметра a приводит к следующему результату: $q = 1 + 2a^2$.

Для сравнения, обратное осреднение (осреднение по Рейссу), которое является оценкой снизу приведенного коэффициента [7], в данном случае определяется соотношением: $\underline{q} = 1 + a^2$.

5.2. $a \rightarrow 1$ – большие размеры включений. Из (3.4), очевидно, получаем следующее асимптотическое выражение осредненного коэффициента:

$$q = 1 / (1 - a).$$

Приведем также результаты сравнения значений эффективного параметра теплопроводности, вычисленного по формуле (2.26), с известными данными – где это возможно (таблицы 1, 2). Курсивом в таблицах 1, 2 отмечены графические результаты.

Таблица 1

Непроводящие включения

Значения приведенного коэффициента теплопроводности q			
$\lambda = 0$; $a = 1/3$			
Вариационный метод Галеркина [5]	Метод R -функций [5]	Численные решения [7]	Трехфазная модель, формула (2.26)
0,8232	0,8187	<i>0,81</i>	0,8000

Таблица 2

Вставки большой теплопроводности, включая случай абсолютной проводимости

Значения приведенного коэффициента теплопроводности q		
$\lambda = 10$; $a = 1/2$		
Численные решения [7]	Трехфазная модель, формула (2.26)	Погрешность решения по трехфазной модели
1,548	1,5143	-2,18%
$\lambda = 114$; $a = 1/3$		
Численные решения [7]	Трехфазная модель, формула (2.26)	Погрешность решения по трехфазной модели
1,2500	1,2451	-0,39%
$\lambda \rightarrow \infty$; $a = 1/3$		
Численные решения [7]	Трехфазная модель, формула (2.26)	Погрешность решения по трехфазной модели
<i>1,3</i>	1,2500	-3,85%

Таким образом, анализируя приведенные выше асимптотические разложения и результаты сравнения с данными других авторов, заключаем: трехфазная модель в случае цилиндрических включений квадратного профиля уже в нулевом приближении дает достаточно точные решения для приведенного параметра теплопроводности во всем диапазоне изменения геометрического размера включений и их физической характеристики (теплопроводности), включая предельные случаи. Этот вывод подтверждается следующим:

1. решение с использованием трехфазной модели (2.26) точно удовлетворяет классической теореме Келлера (3.1);
2. асимптотическое соотношение (3.3) для предельно больших непроводящих включений совпадает с известным разложением [1];

3. сравнение значений эффективного параметра теплопроводности, вычисленного по формуле (2.26), с известными результатами других авторов (для различных случаев размеров и проводимости включений) указывают на достаточно высокую точность предлагаемого подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахвалов Н. С., Панасенко Г. Л. Осреднение процессов в периодических средах. – М.: Наука, 1984. – 252 с.
2. Гузь А. Н., Немиш Ю. Н. Методы возмущений в пространственных задачах теории упругости. – К.: Вища школа, 1982. – 352 с.
3. Кристенсен Р. М. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
4. Немиш Ю. Н. Элементы механики кусочно-однородных тел с неканоническими поверхностями раздела. – К.: Наукова думка, 1989. – 312 с.
5. Andrianov I. V., Starushenko G. A. Asymptotic methods in the theory of perforated membranes of nonhomogeneous structure. – Engineering Transaction, 1995, v. 43, p. 5-18.
6. Batchelor G. K. Transport properties of two-phase materials with random structure. – A. Rev. Fluid Mech., 1974, v. 6, p. 227-255.
7. Bourgat J. F. Numerical experiments of the homogenization method for operators with periodic coefficients. – Lectures Notes in Math., 1979, v. 704, p. 330-356.
8. Christensen R. M., Lo K. H. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. – J. Mechanics and Physics of Solids, 1979, v. 27, p. 315-330.
9. Hashin Z. The elastic moduli of heterogeneous materials. – J. Appl. Mech., 1962, v. 29, p. 143-150.
10. Hashin Z., Rosen B. W. The elastic moduli of fiber-reinforced materials. – J. Appl. Mech., 1964, v. 31, p. 223.
11. Keller J. B. A theorem on the conductivity of a composite medium. – J. Math. Phys. 5, 1964, p. 548-549.
12. Kerner E. H. The elastic and thermoelastic properties of composite media. – Proceedings of the Physics Society, 1956, 69, p. 808-820.
13. Lions J.-L. On same homogenisation problem. – ZAMM, 1982, v. 62, N 5, p. 251-262.
14. Van der Pol C. On the rheology of concentrated dispersions. – Rheology Acta, 1958, 1, p. 198-211.

Получено 06.04.2007 г.

УДК 004.91

А.А. Лигун, А.А. Шумейко, Д.В. Тимошенко

О ЛОКАЛИЗАЦИИ И ФОРМИРОВАНИИ СИМВОЛОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТАХ СО СЛОЖНЫМ ФОНОМ

Введение

При современном развитии информационных технологий все большую значимость приобретает информация, получаемая посредством Интернет. Поэтому актуальным остается вопрос о сжатии, хранении и передаче электронных документов, анализе содержащейся текстовой информации, защите авторских прав, организации доступа и т.д. Существуют несколько форматов для хранения электронных растровых документов: DJVU[1], JPEG2000/Part 6[2] и LuraDocument (формат PDF является векторным, поэтому нами не рассматривается). В основу этих форматов положены идеи о разделении документа на цветовые плоскости, смысловую информацию и подложку. Заметим, что по своей сути эти форматы являются локальными, и их использование в сети сводится к передаче файла целиком. Фактически передается копия документа и дальнейшее ее использование проконтролировать сложно.

Авторами разработан подход к хранению и передаче электронных документов, который позволяет защитить информацию от несанкционированного копирования и снизить объемы передаваемых данных[3]. Данный подход реализован в виде формата ALD (ALLDocument), который ориентирован на использование в сети, но может быть использован и для работы на локальной машине. Метод сжатия документов ALLDocument основан на естественных принципах разделения на информативные слои. Предложенный подход, вместе с графическим форматом FWT, разработанным авторами, позволил получить формат, являющийся конкурентоспособным на рынке подобных продуктов.

В формате ALD заложена большая алгоритмическая гибкость, отражающаяся в замене и добавлении различных слоев информации и способов их кодирования. Каждый слой кодируется соответствующим обработчиком, который ориентирован на его

особенности. На данном этапе нами предусмотрена обработка следующих слоев:

1. Слой символьной информации.
2. Слой деловой графики.
3. Слой растровой информации.
4. Слой фона.

Представленные слои охватывают большинство типичных документов. Некоторые подходы к локализации слоя «деловая графика» нами рассматривались в работе [4].

Цель данной работы является описание первой части векторизации – локализации и формирования символов.

Существуют различные алгоритмы получения символьного слоя. При этом обычно предполагается, что символы расположены на однородном фоне, символы темнее – фон светлее, ярко выражены строки и столбцы, текст имеет горизонтальную ориентацию. Во многих случаях такие предположения отражают текущие характеристики обрабатываемого растрового документа. Однако круг документов, которые не охватываются подобным подходом, тоже весьма широк. Это различная полиграфическая продукция – иллюстрированные журналы, газеты, обложки книг и т.д.

Целью данной работы является разработка алгоритма локализации и формирования символьного слоя, который успешно сможет работать, как и в случае с однородным фоном, так и в случае сложного фона, в случае текста любой ориентации и любого соотношения его яркости и яркости фона.

Изначально нами предполагалось, что символ это часто повторяющееся связанное множество точек со схожей яркостью и контрастное на окружающем фоне. Таким образом, формализация этих понятий является основой предлагаемого алгоритма.

Мы существенно применяли алгоритм, быстро приводящий к результатам, близким к оптимальному - квантованию. Для полноты изложения приведем некоторые факты, касающиеся оптимального квантования.

Оптимальное квантование. Квантование традиционно используется в алгоритмах сжатия числовых последовательностей с потерями. Суть квантования состоит в замене (в соответствии с заданными правилами) оригинальных значений функции

квантовочными числами. По ряду причин чаще всего в алгоритмах сжатия используется не оптимальное (квантование Ллойда-Макса [5, 6 с. 173]), а равномерное квантование. Вместе с тем, оптимальное квантование, являясь более трудоемким аппаратом приближения, дает наилучшее приближение данных квантовочными числами в среднеквадратичной метрике и с увеличением числа квантования ошибка квантования гарантировано не увеличивается.

Прежде чем остановиться на вопросе применения оптимального квантования при анализе числовых последовательностей, уделим внимание вопросу построения оптимальных квантовочных чисел. Известные нам алгоритмы, приводящие к квантованию Ллойда-Макса, как правило, обладают малой устойчивостью и большой ресурсоемкостью. Это как раз и является одной из причин отказа от оптимального квантования в пользу равномерного в алгоритмах сжатия.

В алгоритме локализации символов оптимальное квантование применяется в каждой точке изображения, поэтому вопрос скорости его работы и возможной оптимизации актуален. Авторами используется итерационный алгоритм, который путем уменьшения среднеквадратичной ошибки на каждом шаге, быстро дает результат, близкий к оптимальному. Что в итоге позволяет ограничиться заданным числом итераций квантования без критерия останова, зависящего от пересчитываемой ошибки квантования.

Пусть задана произвольная ограниченная функция дискретного аргумента $\varphi_i (i=1,2,...,N)$ и I_n , который представляет собой вектор с координатами $b_{k+1/2}$ такими, что

$$\Phi^- = b_{1/2} < b_{3/2} < \dots < b_{n+1/2} = \Phi^+,$$

$$\text{где } \Phi^- = \min_i \varphi_i, \Phi^+ = \max_i \varphi_i.$$

$$\text{Положим } \Phi_{k+1/2}^+ = \{\varphi_i \mid \varphi_i \leq b_{k+1/2}\} \quad \Phi_{k+1/2}^- = \{\varphi_i \mid \varphi_i \geq b_{k+1/2}\}.$$

Кроме того, пусть для $k=1,2,...,n$

$$\Delta\Phi_k = \Phi_{k+1/2}^+ \cap \Phi_{k-1/2}^-, \quad (1)$$

Через δ_n обозначим множество фиксированных $\{b_k\}_{k=1}^n$ таких, что

$$b_1 < b_2 < \dots < b_n, \text{ где } b_{k-1/2} < b_k < b_{k+1/2}.$$

Процедуру построения вектора δ_n будем называть правилом квантования функции $\varphi_i (i=1,2,...,N)$ на n интервалов, числа b_k -

квантовочными числами, $(b_{k-1/2}, b_{k+1/2})$ - интервалами квантования. Замена функции $\varphi_i (i=1,2,\dots,N)$ кусочно-постоянной $\tilde{\varphi}$, такой, что $\tilde{\varphi}_i = b_k$ при $i: \varphi_i \in \Delta\Phi_k$, называется квантованием, при этом величина

$$\varepsilon(\varphi, \delta_n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \sum_{i: \varphi_i \in \Delta\Phi_k} (\varphi_i - b_k)^2} \quad (2)$$

называется ошибкой квантования.

Правило квантования, определяющее вектор δ_n^* такой, что

$$\varepsilon(\varphi, \delta_n^*) = \min_{\delta_n} \varepsilon(\varphi, \delta_n)$$

называется оптимальным квантованием или квантованием Ллойда-Макса.

Пусть n_k - число элементов множества $\Delta\Phi_k$. При любых фиксированных интервалах квантования, оптимальные квантовочные числа b_k для среднеквадратической метрики определяются равенствами

$$b_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i: \varphi_i \in \Delta\Phi_k} \varphi_i. \quad (3)$$

Заметим, что интервалы квантования, квантовочные числа, а также ошибка квантования не зависят от того, строятся они для функции f или для ее неубывающей перестановки Харди. Поэтому, не теряя общности рассуждений, рассмотрим результаты для неубывающей функции.

Теорема. Пусть f измеримая суммируемая в квадрате неубывающая функция. Обозначим через $m_{ab}(f) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$ среднее значение функции на отрезке $[a, b]$. Тогда для любой точки $c \in [a, b]$ и такой $c^* \in [a, b]$, в которой выполняется условие $f(c^*) = \frac{m_{ac} + m_{cb}}{2}$, справедливо неравенство

$$\int_a^c (f(x) - m_{ac}(f))^2 dx + \int_c^b (f(x) - m_{cb}(f))^2 dx \geq \int_a^{c^*} (f(x) - m_{ac^*}(f))^2 dx + \int_{c^*}^b (f(x) - m_{c^*b}(f))^2 dx.$$

Доказательство. Обозначим через

$$\Phi(c, m^-, m^+) = \int_a^c (f(x) - m^-)^2 dx + \int_c^b (f(x) - m^+)^2 dx.$$

Найдем такое значение c^* , при котором функция $\Phi(c, m^-, m^+)$ достигает своего минимума.

$$\frac{\partial \Phi(c, m^-, m^+)}{\partial c} = (f(c) - m^-)^2 - (f(c) - m^+)^2 = 0.$$

Таким образом, минимум достигается при c^* , для которого выполняется условие

$$f(c^*) = \frac{m^- + m^+}{2}.$$

То есть

$$\int_a^{c^*} (f(x) - m^-)^2 dx + \int_{c^*}^b (f(x) - m^+)^2 dx \geq \int_a^{c^*} (f(x) - m^-)^2 dx + \int_{c^*}^b (f(x) - m^+)^2 dx.$$

Найдем m^{*-}, m^{*+} , при которых $\Phi(c^*, m^-, m^+)$ достигает минимума.

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi(c^*, m^-, m^+)}{\partial m^-} = -2 \left(\int_a^{c^*} f(x) dx - (c^* - a) \cdot m^- \right) = 0, \\ \frac{\partial \Phi(c^*, m^-, m^+)}{\partial m^+} = -2 \left(\int_{c^*}^b f(x) dx - (b - c^*) \cdot m^+ \right) = 0. \end{cases}$$

Таким образом, минимум получаем при

$$m^{*-} = \frac{1}{c^* - a} \int_a^{c^*} f(x) dx, \quad m^{*+} = \frac{1}{b - c^*} \int_{c^*}^b f(x) dx.$$

Следовательно,

$$\int_a^{c^*} (f(x) - m^-)^2 dx + \int_{c^*}^b (f(x) - m^+)^2 dx \geq \int_a^{c^*} (f(x) - m^{*-})^2 dx + \int_{c^*}^b (f(x) - m^{*+})^2 dx.$$

Теорема доказана.

Применяя процедуру, описанную в теореме, к произвольному методу квантования, на каждом шаге получаем новое квантование с гарантированно не увеличивающейся ошибкой (а в большинстве случаев – меньшей ошибкой).

Сформулируем итерационный алгоритм, приводящий к результатам, близким к оптимальному квантованию.

Для заданой ограниченной функции дискретного аргумента $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, N)$ первоначальный вектор I_n зададим равномерным разбиением множества значений функции

$$b_{k+1/2} = \min_i \varphi_i + k \frac{\max_i \varphi_i - \min_i \varphi_i}{n}, \quad k = \overline{0, n}.$$

1. $k = 1$.

2. Вычислим $\Delta\Phi_k, \Delta\Phi_{k+1}$ в соответствии с (1) и b_k, b_{k+1} согласно (3).

3. Согласно теореме пересчитываем $(k+1/2)$ -ую границу квантования

$$b_{k+1/2} = \frac{b_{k+1} + b_k}{2}.$$

3. $k = k + 1$. Если $k < n$ – пункт 2.

4. Если ошибка квантования стабилизировалась – алгоритм останавливается, в противном случае – пункт 1.

Заметим, что в практических приложениях, где важна скорость работы алгоритма, можно обойтись без пересчета ошибки квантования после каждой полной итерации, а задаться наперед количеством полных итераций.

Локализация символов. Локализация символов заключается в выделении в отдельный слой пикселей, которые, скорее всего, принадлежат образу символа, и объединении полученных точек в множества, представляющие собой битовую маску символа (в дальнейшем просто символа). Локализацию символов будем проводить в два этапа.

1 Этап. Нахождение множества всех точек, принадлежащих символу или его окрестности (точки, полученные на этом этапе, будем называть точками символа первого рода). Формирование связанных множеств $\{S_k^*\}_{k=1}^n$ из точек символов первого рода.

2 Этап. Построение на основе $\{S_k^*\}_{k=1}^n$ множеств $\{S_k\}_{k=1}^m, m \geq n$. Точки, принадлежащие множествам $\{S_k\}_{k=1}^m$, будем называть точками символа второго рода или просто точками символа.

Перейдем к более детальному описанию этапов локализации.

Будем работать с люминесцентной составляющей изображения (освещенность). Итак, пусть задана числовая матрица $Y = \{y_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W,H}$. При локализации символов исходим из основного предположения, что люминесцентная составляющая символа достаточно контрастна на окружающем фоне.

1 Этап. Будем считать точку изображения точкой символа первого рода, если:

Значения яркостей ее окрестности хорошо квантуются в два интервала при помощи оптимального квантования. То есть значения

яркости окрестности группируются около ярко выраженных значений – средней яркости фона и символа.

Число точек, которые группируются около средней яркости фона, примерно равно числу точек, которые группируются около средней яркости символа – данная точка лежит на границе символа или около нее.

При этом, исходя из предположения о достаточной контрастности точек символа, полученные средняя яркость фона и символа существенно отличаются.

Пример поведения значений яркости окрестности точки символа первого рода приведен на рис 2, пример поведения точки, которая не является точкой символа первого рода – рис. 1.

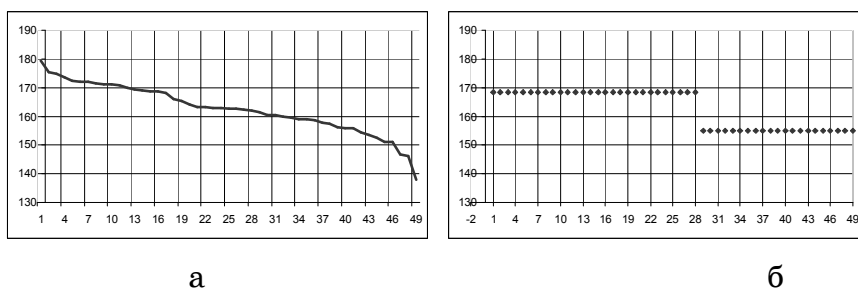


Рисунок 1 – а) типичный вид перестановки значений яркости в области точки, не являющейся точкой первого рода; б) типичный вид перестановки значений яркости в области точки, не являющейся точкой первого рода, отквантованная на 2 интервала (по оси X – номер точки в последовательности, по оси Y – ее яркость)

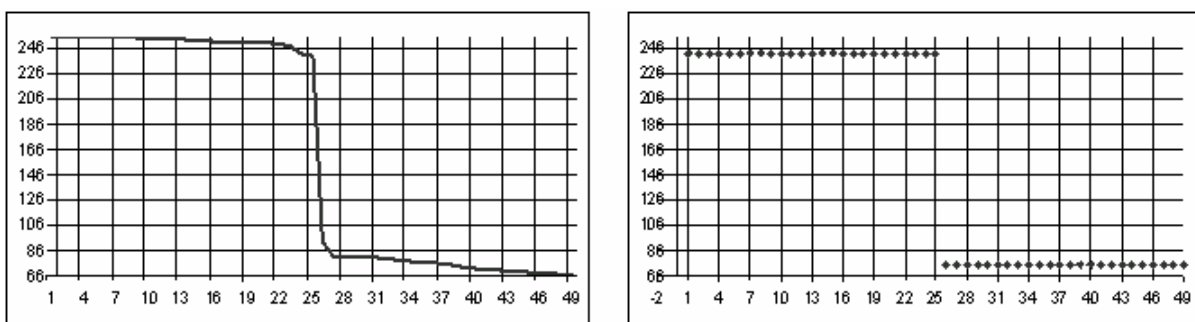


Рисунок 2 – а) перестановка люминесцентной составляющей окрестности точки символа первого рода; б) перестановка люминесцентной составляющей окрестности точки символа первого рода, отквантованная на 2 интервала (по оси X – номер точки в последовательности, по оси Y – ее яркость)

Для каждой точки с координатами (i, j) определим окрестность $D_{i,j}^N = [i - N, i + N] \times [j - N, j + N]$. Для каждой фиксированной точки документа с координатами (i, j) построим убывающую перестановку

яркости всех пикселей $y_{v,\mu}$ таких, что $(v,\mu) \in D_{i,j}^N$ (рис. 1а, рис. 2а). К последовательности яркостей применим оптимальное квантование на два интервала, результатом которого будет вектор $\delta_2 = (b_1, b_2)$. Восстанавливая первоначальную информацию по квантовочным числам, получаем новую перестановку для заданной окрестности $\tilde{y}_{v,\mu}$ (рис. 1б, рис. 2б).

Каждой точке (i, j) поставим в соответствие число $\chi_{i,j}$

$$\chi_{i,j} = \frac{\sum \{1 \mid (v,\mu) \in D_{i,j}^N, \tilde{y}_{v,\mu} = b_1\}}{(2N+1)^2}.$$

и относительную ошибку квантования

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum (y_{v,\mu} - \tilde{y}_{v,\mu})^2 \mid (v,\mu) \in D_{i,j}^N}}{\sqrt{\sum y_{v,\mu}^2 \mid (v,\mu) \in D_{i,j}^N}} \cdot 100\%.$$

Зададим управляющие параметры $\delta_1 > 0, \delta_2 > 0, \delta_3 > 0, \delta_4 > 0$. Точка (i, j) является точкой символа первого рода, если одновременно выполняются следующие условия

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i,j} &< \delta_1, \\ \frac{b_2 - b_1}{b_2} \cdot 100\% &> \delta_2, \\ |\chi_{i,j} \cdot 100\% - \delta_3| &< \delta_4. \end{aligned}$$

Оптимальные значения параметров $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ подбираются путем имитационного моделирования или с помощью обучающих алгоритмов. Нами были выбраны такие значения параметров: $\delta_1 = 10\%, \delta_2 = 70\%, \delta_3 = 50\%, \delta_4 = 10\%$.

Завершением первого этапа локализации является построение связанных множеств точек символа первого рода. Для этого нам понадобятся несколько определений.

Точки (x_1, y_1) и (x_2, y_2) будем называть смежными, если выполняется условие $|x_1 - x_2| \leq 1, |y_1 - y_2| \leq 1$.

Множество S будем называть связным, если $\forall (x_1, y_1) \in S$ и $(x_n, y_n) \in S$ $\exists \{(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}), \dots, (x_n, y_n)\}, (x_i, y_i) \in S$, где $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ - смежные точки.

Все множество точек символа первого рода разобьем на множество связанных подмножеств при помощи одной из разновидностей алгоритма заливки[7].

Таким образом, итогом первого этапа локализации является получение связанных множеств $\{S_k^*\}_{k=1}^n$.

2 Этап. Точки символа первого рода показали приблизительное расположение символа. Задача второго этапа по этим оценочным местам уточнить символ.

Заклучим каждое множество S_k^* в примитив Pr_k . Например, таким примитивом может быть примитив, ограниченный внешней границей множества S_k^* . Заметим, что в процессе построения точек символа первого рода может произойти «склейка» слов в одно связанное множество в виду малого размера символов в оригинальном тексте и как следствие малого расстояния между символами (рис. 3). Таким образом, в общем случае будем считать, что в примитиве могут находиться несколько символов.



Рисунок 3 – а) пример связанного множества точек символа первого рода; б) пример примитива для связанного множества точек символа первого рода

Считая, что точки символов, которые находятся в этом примитиве имеют схожую яркость, для получения яркости символов проводим оптимальное квантование на 2 интервала последовательности соответствующих примитиву яркостей.

Для каждого примитива Pr_k построим убывающую перестановку яркости всех пикселей $y_{v,\mu}$ таких, что $(v,\mu) \in Pr_k$. Применяя оптимальное квантование на 2 интервала, получим вектор $C_2 = (c_1, c_2)$. Полученные квантовочные числа c_1, c_2 отражают среднюю яркость

фона и среднюю яркость символа. Однако изначально нам не известно отношение фона и символа в смысле яркости (символ темнее или светлее фона) и без дополнительного уточнения нельзя определенно сказать, что именно отображает каждое квантовочное число.

Для того чтобы определить какое из квантовочных чисел представляет собой яркость символа мы использовали информацию о точках, о которых уже достоверно известна их принадлежность фону. Такими точками являются точки, не попавшие ни в один примитив.

Для каждого примитива построим множество околограничных точек Bg_k , не принадлежащих самому примитиву, но имеющих в окрестности хотя бы одну точку из этого примитива. То есть

$$Bg_k = \{(i, j) \mid \forall l \ (i, j) \notin Pr_l, \exists (v, \mu) \in Pr_k \ (i, j) \in D_{v, \mu}^1\}.$$

Найдем среднюю яркость Bg_k

$$c_k^A = \frac{\sum y_{i,j} \mid (i, j) \in Bg_k}{\sum 1 \mid (i, j) \in Bg_k}.$$

Возвращаясь к квантовочному вектору яркостей примитива $Pr_k \ C_2 = (c_1, c_2)$, считаем яркостью фона то значение, которое более другого отличается от средней яркости фона.

Пусть $|c_k^A - c_1| > |c_k^A - c_2|$. Тогда c_1 – средняя яркость символа в данном примитиве, и все точки, которые попали в соответствующий (в этом случае первый) интервал квантования считаются точками символа второго рода.

То есть точка $(i, j) \in Pr_k$ считается точкой символа второго рода, если $\tilde{y}_{i,j} = c_1$.

Все точки символа второго рода формируют связные множества $\{S_k\}_1^m$, что является финальным этапом приведенного алгоритма локализации и формирования символов. Заметим, что большинство символов, которые попали в одно связное множество на первом этапе, после второго разделяются на самостоятельные.

Пример текста с поэтапными демонстрациями локализации представлен на рис 4.



Рисунок 4 – а) оригинальный текст со сложным фоном; б) точки символа первого рода; в) точки символа второго рода

Выводы

Описан алгоритм локализации и формирования символов с применением оптимального среднеквадратичного квантования.

Предложенный алгоритм локализации и формирования символов был апробирован на реальных растровых документах со сложным фоном, произвольной ориентацией строк текста и различным яркостным соотношением символов и фона. Алгоритм показал себе как устойчивый к размерам символов, расположению, цвету.

Программная реализация алгоритма разработана таким образом, чтобы с подключением новых методов для обработки каждого слоя, техническая функциональность формата ALD не изменялась.

Этап локализации и формирования символов является первым этапом в обработке всего символьного слоя растровых документов. В данной статье мы не касались следующего этапа обработки символьного слоя — кластеризации и построения шаблона кластеров с последующим сжатием на основе словарных методов. Заметим, что вопрос формализации свойства символа многократного повторения в документе решается при кластеризации символов. В этом случае

символы, образующие кластер малой длины изымаются из данного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Specification of DJVu Image Compression Format. – AT&T, 1999. – 39 p.
2. Information technology Jpeg2000 Image Coding System. Final Committee Draft .– 2006. – 205 p.
3. Лигун А.О., Шумейко О.О., Тимошенко Д.В. ALLDocument – технологія нового покоління для збереження, передачі та відображення електронних документів // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля .– №9 (103) Частина 1 .– 2006 .– С. 83-85.
4. Лигун А.О., Шумейко О.О., Тимошенко Д.В. Локализация и формирование линий на изображении // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – № 3(50). – Днепропетровск. 2007. – С. 5-14.
5. Gray R., Neuhoff D. Quantization // IEE Transactions on Information Theory .– 1998 .– 44(6) .– P. 1-63.
6. Gersho A., Gray R. Vector quantization and signal compression. – Boston, 2001. – 730 p.
7. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики .– М.: Мир, 2001 .– 357 с.

Получено __.__.200_ г.

УДК 519.876.2:37.018.4

Л.И. Цвиркун, С.Н. Трипутень

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТЕНДА С НЕУСТОЙЧИВЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ ЛАБОРАТОРИИ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ИНТЕРНЕТ

Введение

В настоящее время известно значительное количество программных систем, предназначенных для решения задач связанных с дистанционным обучением (так называемым e-Learning).

В данной работе рассматривается стенд с неустойчивым динамическим объектом такой лаборатории [1].

Разрабатываемый стенд состоит из двигателя постоянного тока (1), зубчато-ременной передачи (2-4), датчика угла поворота (5), маятника (6), удерживаемого в вертикальном положении и блока управления (БУ), подсоединенного к серверу (рисунок 1).

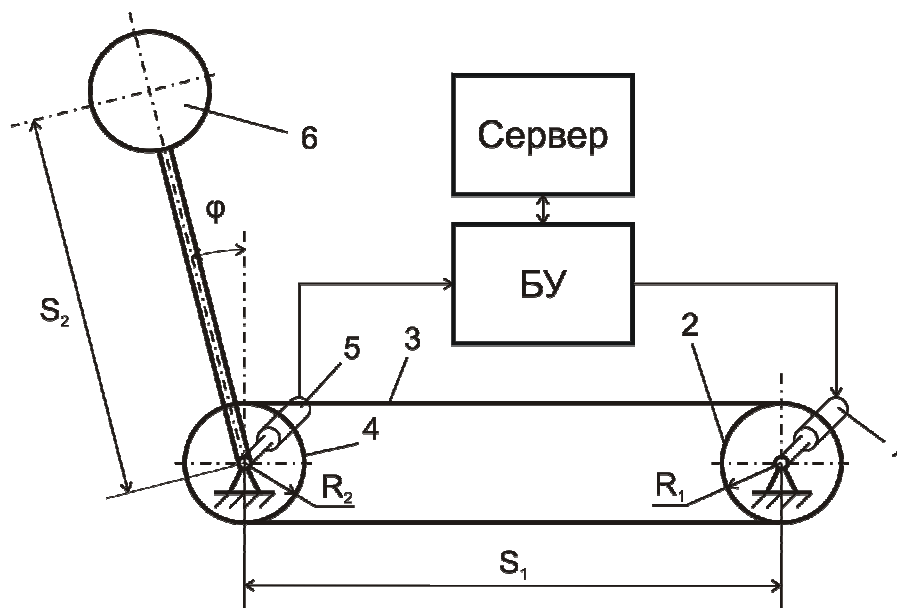


Рисунок 1 - Схема разрабатываемого стенда

Постановка задачи

При разработке алгоритма управления положением маятника важно иметь математическую модель исследуемого объекта. Данный вопрос является одним из важнейших при реализации сложных законов управления.

Модель данного объекта имеет механическую и электрическую части.

Целью настоящей работы является структуризация исследуемого неустойчивого динамического объекта, выделение в нем механической составляющей, разработка и анализ математической модели механической части объекта для дальнейшего ее применения при разработке алгоритмов управления на данном стенде лаборатории.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- собрать данные об объекте;
- выявить его физическую и энергетическую структуры;
- на базе полученной информации разработать математическую модель механической части объекта управления;
- определить порядок взаимодействия всех блоков системы.

Математическая модель системы

С точки зрения автоматизации управление положением маятника можно рассматривать, как типичную задачу разработки системы управления электроприводом, который, в свою очередь, представляет собой электромеханическую систему [2]. Она включает в себя БУ, двигатель, передаточный механизм (ПМ) в виде зубчато-ременной передачи и исполнительный механизм (ИМ) в виде маятника (рисунок 1).

Выделим в ней механическую часть. Для этого в схеме электрического двигателя определим электрическую и механическую составляющие. Электрическую составляющую представим в виде электромеханического преобразователя (ЭМП), а механическую – ротора двигателя (РД).

Таким образом, электрическая часть (ЭЧ) этой электромеханической системы состоит из БУ и ЭМП, а механическая включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма, рисунок 2.

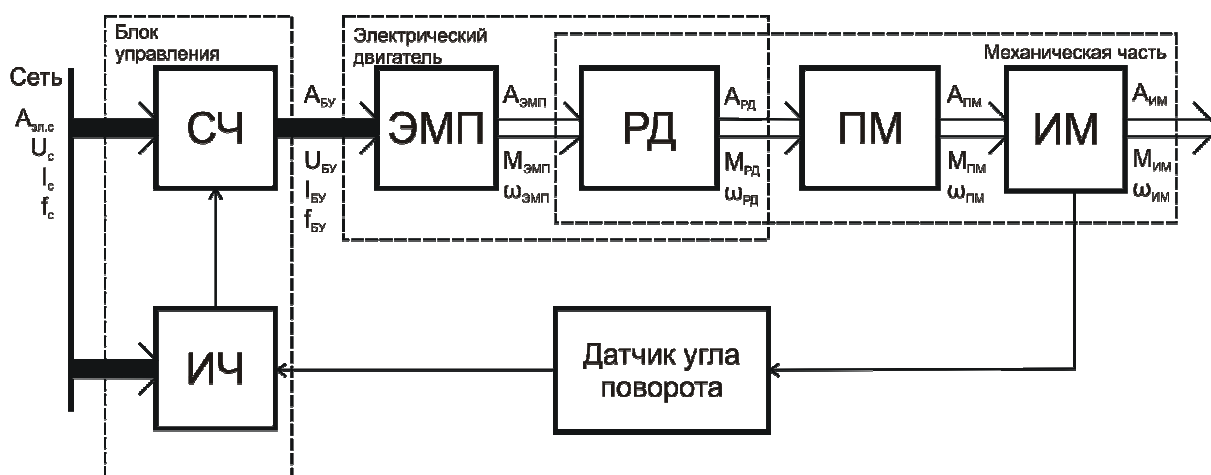


Рисунок 2 - Структурная схема электромеханической системы с выделением механической и электрической частей

На рисунке 2 поток энергии от сети к рабочему органу механизма показан стрелками. Передача потока электрической энергии показана сплошными утолщенными стрелками, а механической – тонкими двойными. Потребляемая из сети электрическая энергия ($A_{эл.с}$) при напряжении (U_c) токе (I_c) и частоте сети (f_c) поступает в силовую часть (СЧ) БУ, которая регулирует поступление электрической энергии в двигатель.

Чаще всего СЧ БУ представляет собой управляемый преобразователь электрической энергии того или иного вида. Электрическая энергия СЧ БУ ($A_{бу}$) при напряжении $U_{бу}$, токе $I_{бу}$ и частоте $f_{бу}$ потребляется двигателем и преобразуется в механическую энергию ротора двигателя $A_{рд}$ [2].

Информационная часть (ИЧ) БУ вырабатывает воздействия, управляющие СЧ, на основе информации о заданных режимах работы и о текущем состоянии системы.

ЭМП можно рассматривать как идеализированный двигатель, ротор которого не обладает механической инерцией и не имеет механических потерь. Этот ротор при скорости $\omega_{эмп}$ развивает электромагнитный момент двигателя $M_{эмп}$ и вырабатывает энергию $A_{эмп}$. Эта энергия передается ротору двигателя (РД), как механическому звену и частично расходуется на увеличение запасенной в его массе кинетической энергии и на компенсацию момента механических потерь двигателя. Оставшаяся часть

механической энергии с ротора двигателя A_{pd} поступает через ПМ в виде механической энергии ПМ A_{nm} в ИМ. На пути от ротора двигателя до ИМ часть энергии затрачивается на увеличение запаса кинетической энергии движущихся масс ПМ и ИМ, а также на компенсацию всех механических потерь в них.

На схеме механическая энергия ИМ $A_{им}$ представляет собой полезную механическую работу, которая совершается моментом $M_{им}$ на рабочем органе при скорости соответственно $\omega_{им}$.

Данная схема достаточно хорошо структурирована для того, чтобы использовать алгебраические методы построения математической модели.

Построение математической модели механической части

Механическая часть электромеханической системы (рисунок 2) включает в себя следующие связанные движущиеся массы: РД, ПМ и ИМ. К РД при скорости $\omega_{эмп}$ приложен электромагнитный момент $M_{эмп}$ и момент сопротивления M_c , под действием которых механическая часть приводится в движение, а ИМ совершает механическую работу.

Для непосредственного представления о движущихся массах установки и механических связях между ними составим кинематическую схему механической части стенда (рисунок 3), где J_1 – момент инерции РД, J_3 , J_4 – моменты инерции ПМ, J_2 – момент инерции ИМ, c_{13} , c_{34} и c_{42} – жесткость механических связей. На кинематической схеме и далее примем, что $\omega = \omega_{эмп}$, $M = M_{эмп}$.

При составлении данной кинематической схемы принято, что механическая часть привода содержит четыре вращательно движущиеся сосредоточенные массы, причем механическая инерция элементов, связывающих эти массы, не учитывается. Каждый вращательно движущийся элемент обладает моментом инерции J_i и связан с $(i+1)$ -м элементом механической связью, обладающей жесткостью $c_{i,i+1}$.

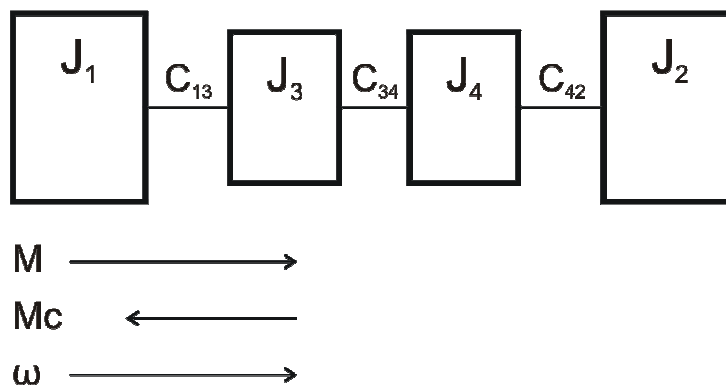


Рисунок 3 - Кинематическая схема стенда

Одной из первых задач проектирования и исследования механических систем является составление упрощенных расчетных схем механической части, в которых пренебрегаются упругостью достаточно жестких механических связей и приближенного учитывается влияния малых движущихся масс.

При этом следует учитывать, что в связи с наличием передач различные элементы системы движутся с разными скоростями и поэтому непосредственно сопоставлять их моменты инерции J_i , жесткости связей $c_{i,i+1}$, деформации $\Delta\varphi_i$ и перемещения φ_i , невозможно. Как следствие, для составления расчетных схем механической части электропривода необходимо приведение всех параметров элементов кинематической цепи к одной расчетной скорости. Обычно наибольшее удобство представляет приведение их к скорости двигателя.

Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии. При приведении необходимо обеспечить сохранение запаса кинетической и потенциальной энергии системы, а также элементарной работы всех действующих в системе сил и моментов на возможных перемещениях.

В этом случае при линейных кинематических связях $i_{li} = const$ для расчета приведенных моментов M_{npi} и моментов инерции J_{npi} элементов кинематической системы, перемещений φ_{npi} , жесткостей механических связей c_{npi} можно использовать следующие формулы [3]:

$$J_{npi} = J_i / i_{li}^2, \quad \varphi_{npi} = \varphi_i i_{li}, \quad c_{npi} = c_i / i_{li}^2 \quad \text{и} \quad M_{npi} = M_i / i_{li},$$

После приведения значений к расчетной скорости представляется возможным, сопоставив приведенные значения моментов инерции и жесткостей, осуществить выбор главных масс и главных упругих связей и на этой основе составить приближенную расчетную схему механической части. Для большей наглядности сопоставления по результатам приведения построим приведенную расчетную схему и представим в ней массы в виде прямоугольников, площадь которых пропорциональна приведенным моментам инерции, а жесткости связей между ними в виде соединений, длина которых обратно пропорциональна жесткости (прямо пропорциональна податливости связей).

Для дальнейшего упрощения выделим в схеме две наиболее значительные массы – ротор двигателя с моментом инерции J_1 и маятник с приведенным моментом инерции J_2 .

Рассматривая эту схему, можно увидеть, что вследствие малости остальных моментов инерции ее можно существенно упростить. Для этого малые массы добавим к большим близлежащим массам, а затем определим эквивалентные жесткости связей между полученными массами по общей формуле:

$$1/c_{\text{экв}} = 1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3 + \dots$$

При переходе к упрощенной расчетной схеме необходимо просуммировать все внешние приложенные к массам силы, связи между которыми принимаются жесткими [2].

Таким образом, данную механическую систему можно привести к двухмассовой схеме (рисунок 4).

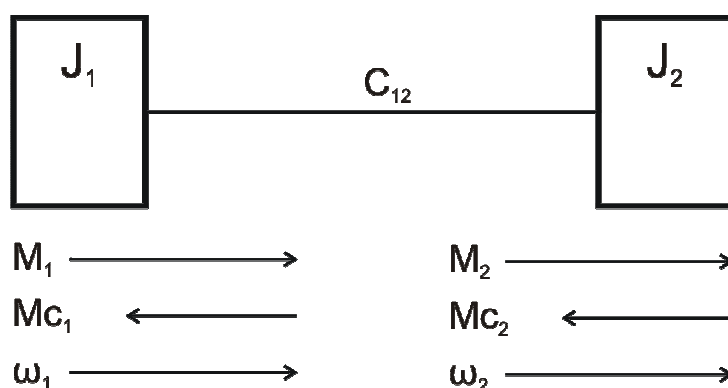


Рисунок 4 - Приведенная кинематическая схема станда

Механическая часть электропривода представляет собой систему твердых тел, на движение которых наложены ограничения, определяемые механическими связями. Уравнения механических

связей устанавливают соотношения между перемещениями в системе, а в тех случаях, когда задаются соотношения между скоростями ее элементов, соответствующие уравнения связей обычно интегрируются.

В механике такие связи называются голономными. В системах с голономными связями число независимых переменных – обобщенных координат, определяющих положение системы, равно числу степеней свободы системы.

Известно, что наиболее общей формой записи дифференциальных уравнений движения таких систем являются уравнения движения в обобщенных координатах (уравнения Лагранжа) [4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i,$$

где W_k – запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i и обобщенные скорости $\dot{q}_i$; $Q_i = \delta A_i / \delta q_i$ – обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ δA_i – всех действующих сил на возможном перемещении δq_i .

Или

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L_k}{\partial q_i} = Q'_i,$$

где L – функция Лагранжа; Q'_i – обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ δA_i всех внешних сил на возможном перемещении δq_i .

Функция Лагранжа представляет собой разность кинетической W_k и потенциальной W_n энергий системы, выраженных через обобщенные координаты q_i и обобщенные скорости $\dot{q}_i$, т. е.: $L = W_k - W_n$

Уравнения Лагранжа дают единый и достаточно простой метод математического описания динамических процессов в механической части привода, а их число определяется только числом степеней свободы системы.

В качестве обобщенных координат могут быть приняты как различные угловые, так и линейные перемещения в системе. Поэтому при математическом описании динамики механической части

системы с помощью уравнений Лагранжа не требуется предварительного приведения элементов к одной скорости.

Однако, как было отмечено, до выполнения операции приведения в большинстве случаев невозможно количественно сопоставлять между собой различные массы системы и жесткости связей между ними, следовательно, невозможно выделить главные массы и главные упругие связи, определяющие минимальное число степеней свободы системы, подлежащее учету при проектировании.

Поэтому составление приведенных расчетных механических схем и их возможное упрощение являются первым важным этапом расчета сложных электромеханических систем электропривода независимо от способа получения их математического описания.

Получим уравнения движения, соответствующие обобщенным расчетным механическим схемам стенда.

В трехмассовой упругой системе обобщенными координатами являются угловые перемещения масс (φ_1 , φ_2 и φ_3), а им соответствуют обобщенные скорости ω_1 , ω_2 и ω_3 . Функция Лагранжа имеет вид:

$$L = W_k - W_n = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} + \frac{J_3 \omega_3^2}{2} - \frac{c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} - \frac{c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2}$$

Для определения обобщенной силы Q'_i необходимо вычислить элементарную работу всех приложенных к первой массе моментов на возможном перемещении:

$$\delta A_1 = (M - M_{c1}) \delta A_1$$

Следовательно, $Q'_1 = M - M_{c1}$.

Аналогично определяются две другие обобщенные силы:

$$Q'_2 = -M_{c2}; \quad Q'_3 = -M_{c3}.$$

С учетом этих выражений, получим следующую систему уравнений движения [2]:

$$\left. \begin{aligned} M - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c1} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - M_{c2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - M_{c3} &= J_3 \frac{d\omega_3}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В (1) пропорциональные деформациям упругих связей моменты являются моментами упругого взаимодействия между движущимися массами системы:

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2); M_{23} = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3). \quad (2)$$

С учетом (2) систему уравнений движения можно представить в таком виде (3):

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} - M_{c1} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{23} - M_{c2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{23} - M_{c3} &= J_3 \frac{d\omega_3}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Рассматривая (3), можно установить, что уравнения движения приведенных масс электропривода одностепенны и отражают второй закон Ньютона.

Движение двухмассовой упругой системы на основе уравнений (3) при $J_3 = 0$, $M_{23} = 0$ и $M_{c3} = 0$ описывается уравнениями (4):

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} - M_{c1} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{c2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что в нашем случае, кроме момента сопротивления M_{c2} , на вторую массу будет действовать также момент маятника, зависящий от угла наклона. Таким образом, система (4) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M - M_{12} - M_{c1}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{12} - M_{c2} - mgl \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где m - масса всей системы маятника; l - расстояние от оси вращения до центра масс; g - ускорение свободного падения;

Полученные системы уравнений движения (5) позволяют проанализировать динамические особенности механической части стенда, как объекта управления, пользуясь методами теории автоматического управления. Основой для анализа являются

структурные схемы, вид которых определяется принятой расчетной схемой механической части.

Для получения структурной схемы трехмассовой упругой механической системы (1) продифференцируем:

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2); \quad \frac{dM_{23}}{dt} = c_{23}(\omega_2 - \omega_3). \quad (6)$$

Далее положим в (3) и (6) $d/dt = p$ получим

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} - M_{c1} &= J_1 p \omega_1; \\ M_{12} - M_{23} - M_{c2} &= J_2 p \omega_2; \\ M_{23} - M_{c3} &= J_3 p \omega_3; \\ p M_{12} &= c_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ p M_{23} &= c_{23}(\omega_2 - \omega_3). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Системе уравнений (7) соответствует структурная схема, приведенная на рисунке 5 [2].

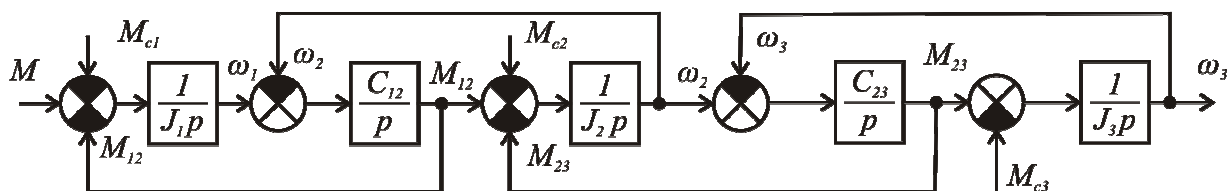


Рисунок 5 - Структурная схема трехмассовой механической системы

Она дает представление о механической части электропривода в виде трехмассовой упругой системы, как объекте управления. Управляющим воздействием здесь является электромагнитный момент двигателя M , а возмущениями – моменты нагрузки M_{c1} , M_{c2} и M_{c3} . Регулируемыми переменными могут быть скорости ω_1 , ω_2 и ω_3 , перемещения φ_1 , φ_2 и φ_3 , а также нагрузки упругих связей M_{12} и M_{21} . Структурно механическая часть электропривода представляет собой сложный объект, состоящий из цепочки интегрирующих звеньев, замкнутых перекрестными внутренними обратными связями.

Аналогично, на основе (4) получим систему уравнений (8) двухмассовой упругой механической системы без учета внутреннего демпфирования:

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} - M_{c1} &= J_1 p \omega_1; \\ M_{12} - M_{23} - M_{c2} &= J_2 p \omega_2; \\ p M_{12} &= c_{12}(\omega_1 - \omega_2). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Более детальный анализ свойств этой системы можно провести на основе двухмассовой расчетной схемы, структура которой представлена на рисунке 6.

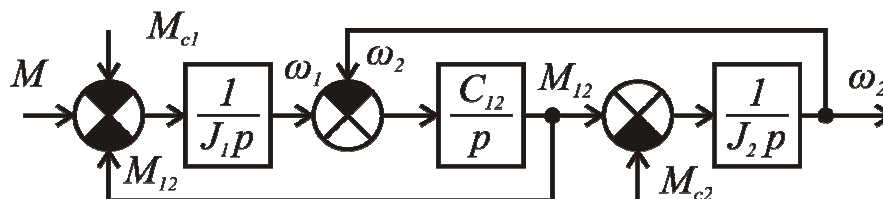


Рисунок 6. Структурная схема двухмассовой механической системы

Для исследования свойств этой системы, как объекта управления, примем возмущения $M_{c1} = M_{c2} = 0$, перенесем внутреннюю связь по упругому моменту на выход системы и выполним преобразования структурной схемы двухмассовой упругой механической системы без учета внутреннего демпфирования (рисунок 7).

Таким образом, получены системы уравнений, описывающие механическую часть стенда в виде двух- и трехмассовой систем. Также приведено ее описание и структурная схема в пространстве сигналов, а путем эквивалентных преобразований получена передаточная функция, связывающая момент с угловой скоростью системы.

Выводы

Проведенные исследования позволили:

- определить, что неустойчивый динамический объект стенда представляет собой электромеханическую систему, электрическая часть которой состоит из электромеханического преобразователя энергии и блока управления, а механическая включает в себя все связанные движущиеся массы привода и исполнительного механизма;
- разработать математическую модель механической части стенда в виде двухмассовой расчетной схемы.
- получить передаточную функцию механической части стенда, связывающую момент с угловой скоростью системы.

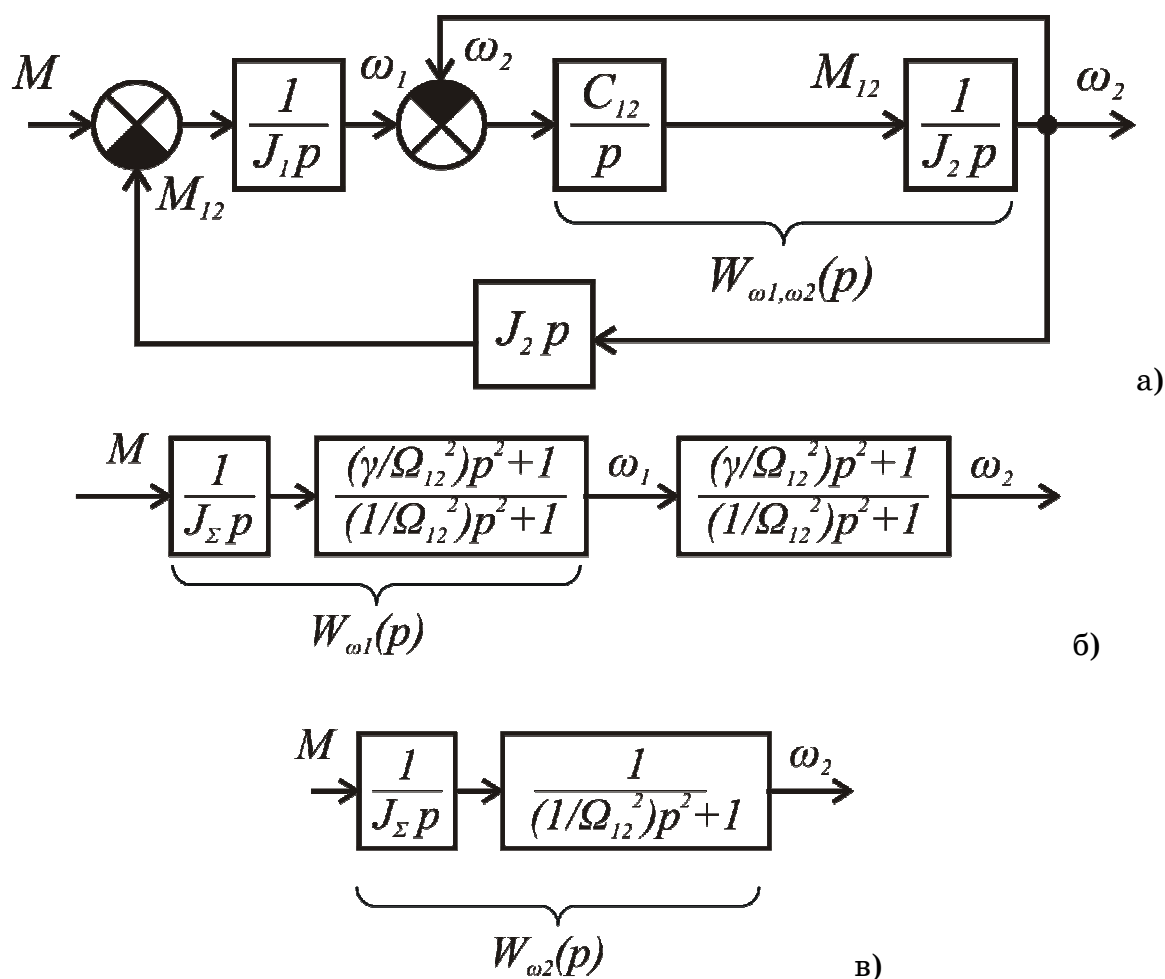


Рисунок 7 - Преобразование структурной схемы двухмассовой механической системы: исходная схема (а), перенесение внутренней связи по упругому моменту (б), преобразованная схема (в)

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsvirkun L., Kmitina I., Goncharuk S. Cisco Systems concepts implementation for studying complex mechatronic system via Internet // Proceedings 6th RoEduNet International Conference. – Craiova, 2007. – P. 156–158.
2. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. Курс теоретической механики: Учебник для вузов / В. И. Дронг, В. В. Дубинин, М. М. Ильин и др.; Под общ. ред. К. С. Колесникова. (Сер. Механика в техническом университете; Т. 1) – М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 736 с.
4. Справочник по электрическим машинам: В 2-х т. Т. 2/ Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

Получено 15.01.2008 г.

УДК 621.774.35.016.3

В.У. Григоренко, И.В. Маркевич

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РОЛИКОВОЙ ПРОКАТКИ НА БАЗЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ

Введение. Процесс холодной прокатки труб роликами (процесс ХПТР рис.1) применяется для получения особотонкостенных труб [1].

Проблема. В настоящее время при расчете процесса ХПТР и дальнейшей разработке соответствующих калибровок инструмента используют метод [3], где изменение всех параметров по длине зоны обжатия стенки зависит от первичного распределения толщины стенки по длине соответствующей зоны (рис. 1).

Значение толщины стенки по сечениям обжимной зоны определяют по зависимости Ю.Ф. Шевакина [3,4]. При этом интенсивность уменьшения толщины стенки по длине участка обжатия стенки зависит от коэффициента n , который рекомендуется равным 0,64 для всех марок сталей.

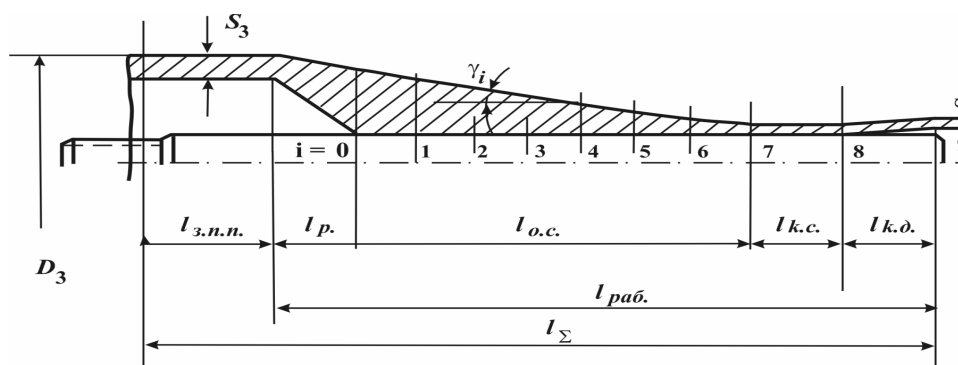


Рисунок 1 - Рабочий конус в стане ХПТР: $l_{3.п.п.}$ - длина участка зева подачи и поворота; l_p - длина участка редуцирования; $l_{o.с.}$ - длина участка обжатия стенки; $l_{к.с.}$ - длина участка калибровки стенки; $l_{к.буд.}$ - длина участка калибровки диаметра; $l_{раб.}$ - длина рабочей части конуса раскатки; l_{Σ} - длина хода клетки; D_3 - диаметр трубы заготовки; S_3 - толщина стенки трубы заготовки; γ_i - угол конусности рабочего конуса.

Коэффициент n определяет интенсивность изменения относительного обжатия толщины стенки в мгновенном очаге деформации по закону показательной функции по длине обжимной зоны рабочего конуса.

В литературе нет метода позволяющего найти рациональные значения n для роликовой прокатки труб из различных марок стали, для каждого конкретного маршрута прокатки и величины подачи.

Народно-хозяйственная задача состоит в том, что необходимо уменьшить высокие расходные коэффициенты дорогостоящего металла и трудозатраты, свойственные технологии производства особотонкостенных труб.

Анализ исследований. В известном методе расчета параметров процесса ХПТР сначала определяют распределение стенки по контрольным сечениям рабочего конуса, а затем все остальные параметры, распределение которых по длине зоны обжатия стенки (рис. 1) зависит от коэффициента n .

$$t_i = \frac{t_0}{\frac{\mu_t - 1}{1 - e^{-n}} \left(1 - e^{-n \frac{x}{l_p}} \right) + 1} \quad (1)$$

где t_0 – значение толщины стенки на входе в участок обжатия стенки рабочего конуса, t_i – значение толщины стенки по сечениям рабочего конуса, n – коэффициент интенсивности распределения относительного обжатия стенки по длине участка обжатия стенки рабочего конуса, e – основание натурального логарифма, x – расстояние от начала участка обжатия стенки до контрольного сечения, l_p – длина участка обжатия стенки.

При этом методика расчета в основном перенесена из методики для расчета параметров процесса холодной пильгерной валковой прокатки труб [3].

Нерешенным является вопрос, какие значения n необходимо выбирать для конкретных маршрутов, марок сталей и условий прокатки. Следует отметить, что использование в процессе ХПТР цилиндрической оправки по сравнению с оправками с конической или с криволинейной образующей для процесса ХПТ должно вносить свои корректировки.

Цель разработки. Поставлена задача объединить в едином комплексе известные формулы, описывающие деформационные и силовые параметры процесса, выполнить его компьютерную реализацию, провести расчетный анализ распределение величин параметров процесса ХПТР по длине рабочего конуса при различных

значениях n , для различных марок сталей, труб и выдать рекомендации по определению значений n .

Результаты разработки. Математическое описание расчета параметров процесса ХПТР состоит в следующей последовательности зависимостей.

1. Деформационные параметры по контрольным сечениям рабочего конуса

1.2. Значение суммарного нарастающего коэффициента витяжки по формуле (1)

$$\mu_{t_i} = \frac{t_0}{t_i}$$

1.3. Обжатие толщины стенки в мгновенном очаге деформации при прямом ходе клетки

$$\Delta t_{npi} = 0,7 \cdot m \cdot \mu_{t_i} \cdot tg\gamma_i$$

где, m – величина подачи; $tg\gamma_i = (D_{i-1} - D_i)/l_x$ – конусность ручья калибра, здесь, D_i и D_{i-1} – диаметры прокатываемой трубы в рассматриваемом и в предшествующем контрольном сечении, l_x – длина участка рабочего конуса между контрольными сечениями

1.4. Относительное суммарное обжатие площади поперечного сечения

$$\varepsilon_i = \frac{\pi \cdot (D_3 - t_3) \cdot t_3 - \pi \cdot (D_i - t_i) \cdot t_i}{\pi \cdot (D_3 - t_3) \cdot t_3}$$

где D_3, D_i, t_3, t_i – диаметры и толщины стенок заготовки и трубы в контрольных сечениях

2. Предел прочности металла трубы и сила прокатки по контрольным сечениям рабочего конуса

2.1. Предел прочности [5]

$$\sigma_{\sigma i} = \sigma_{\sigma 0} + k_{\sigma} \cdot (\varepsilon_i)^{k_m}$$

где k_m, k_{σ} – коэффициенты зависящие от марки стали

3.2. Среднее контактное нормальное напряжение

$$p_{cpi} = \sigma_{\sigma i} \cdot \left[n_{\omega} + f \cdot \left(\frac{t_3}{t_i} - 1 \right) \cdot \frac{R_{\text{дна}}}{R_{\kappa}} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot R_{\text{дна}} \cdot \Delta t_{npi}}}{S_i} \right]$$

где, $R_{\text{дна}}, R_{\kappa}$ – радиус дна калибра и катающий радиус, f – коэффициент трения, n_{ω} – коэффициент учитывающий влияние среднего главного напряжения.

2.3. Площадь контактной поверхности с учетом сплющивания ролика в очаге деформации при прямом ходе

$$F_{\Gamma i} = 2 \cdot R_{mpi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot \eta \cdot \sqrt{2 \cdot R_{\text{она}} \cdot \Delta t_{\text{при}} + \left(\frac{p_{\text{ср}i} \cdot R_{\text{она}}}{9500}\right)^2} + \frac{p_{\text{ср}i} \cdot R_{\text{она}}}{9500}$$

где, R_{mp} – радиус трубы, η - коэффициент формы контактной поверхности, учитывающий ее языкообразную форму.

$$P_i = p_{\text{ср}i} \cdot F_{\Gamma i}$$

2.4. Сила прокатки

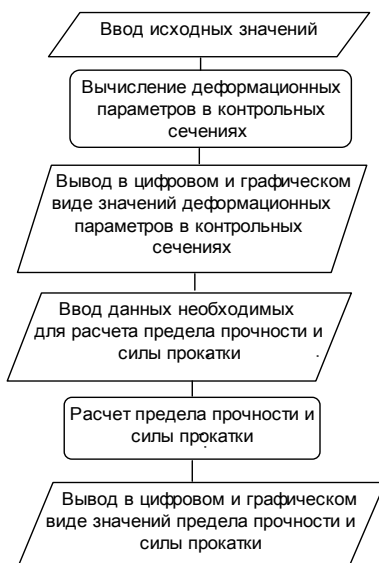


Рисунок 2 - Упрощенная блок-схема расчета параметров процесса

На базе математического описания осуществляем компьютер-ную реализацию расчета параметров процесса ХПТР. Ниже представлена упрощенная блок-схема на рис.2

Провели расчеты рис.3., рис. 4. при различных значениях коэффициента n деформационных и силовых параметров процесса ХПТР для маршрута $30\text{Ч}1,4 \rightarrow 28\text{Ч}0,7$, марка материала трубы сталь 12Х18Н10Т и сталь 20, подача $m=4\text{мм}$. Анализ показывает, что при значениях коэффициента $n=2,0$ для стали 12Х18Н10Т и $n=1,0$ для стали 20 распределение силы прокатки по длине участка обжатия стенки равномерно.

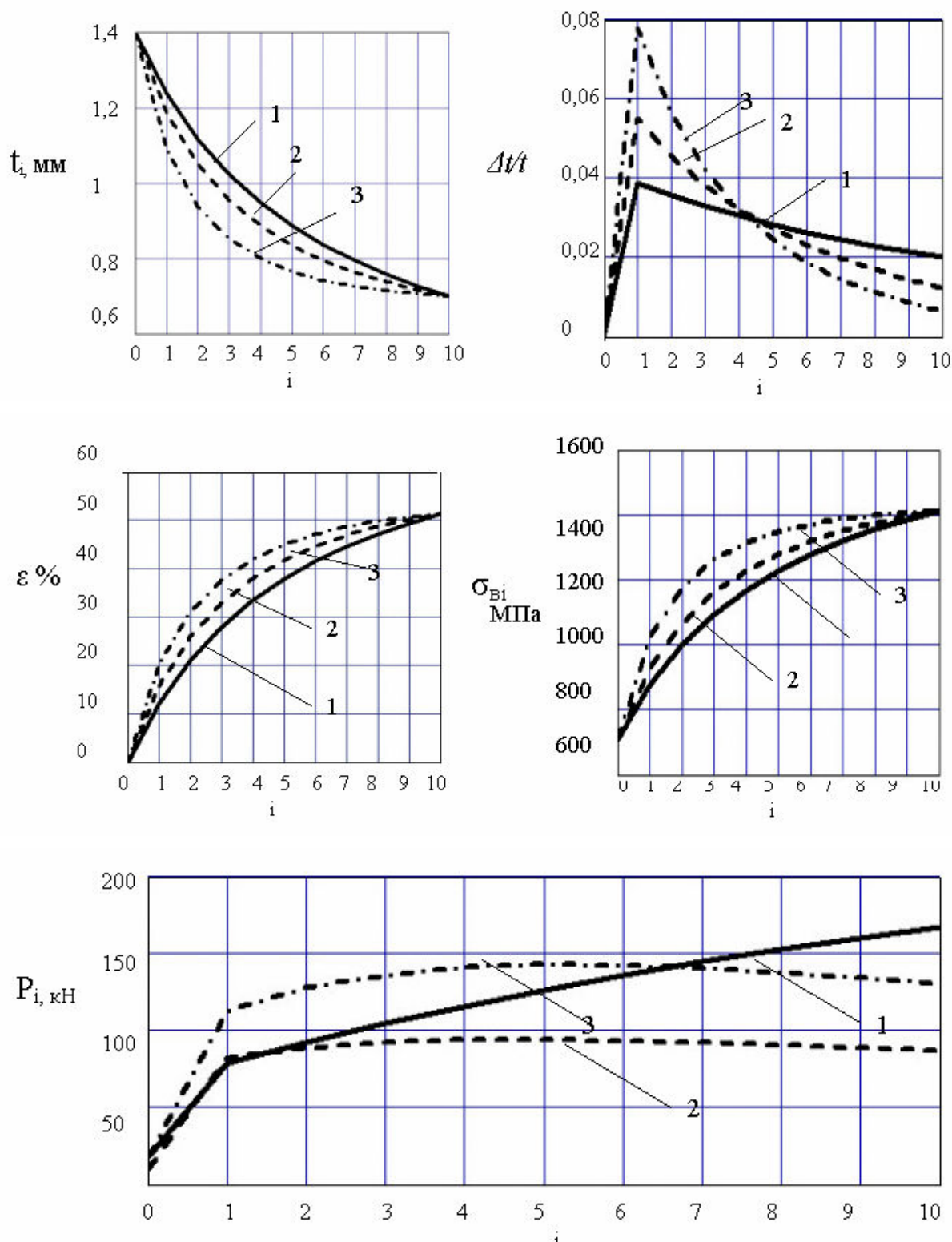


Рисунок 3 - Расчетное распределение основных параметров процесса ХПТР для стали 12X18H10T по 10 контрольным сечениям рабочего конуса при различных значениях $n = 0,64$ (1- —); 1,5 (2- ----); 2,0 (3- - · - · -), маршрут прокатки 30Ч1,4 → 28Ч0,7, стан ХПТР 15-30, i – номер контрольного сечения

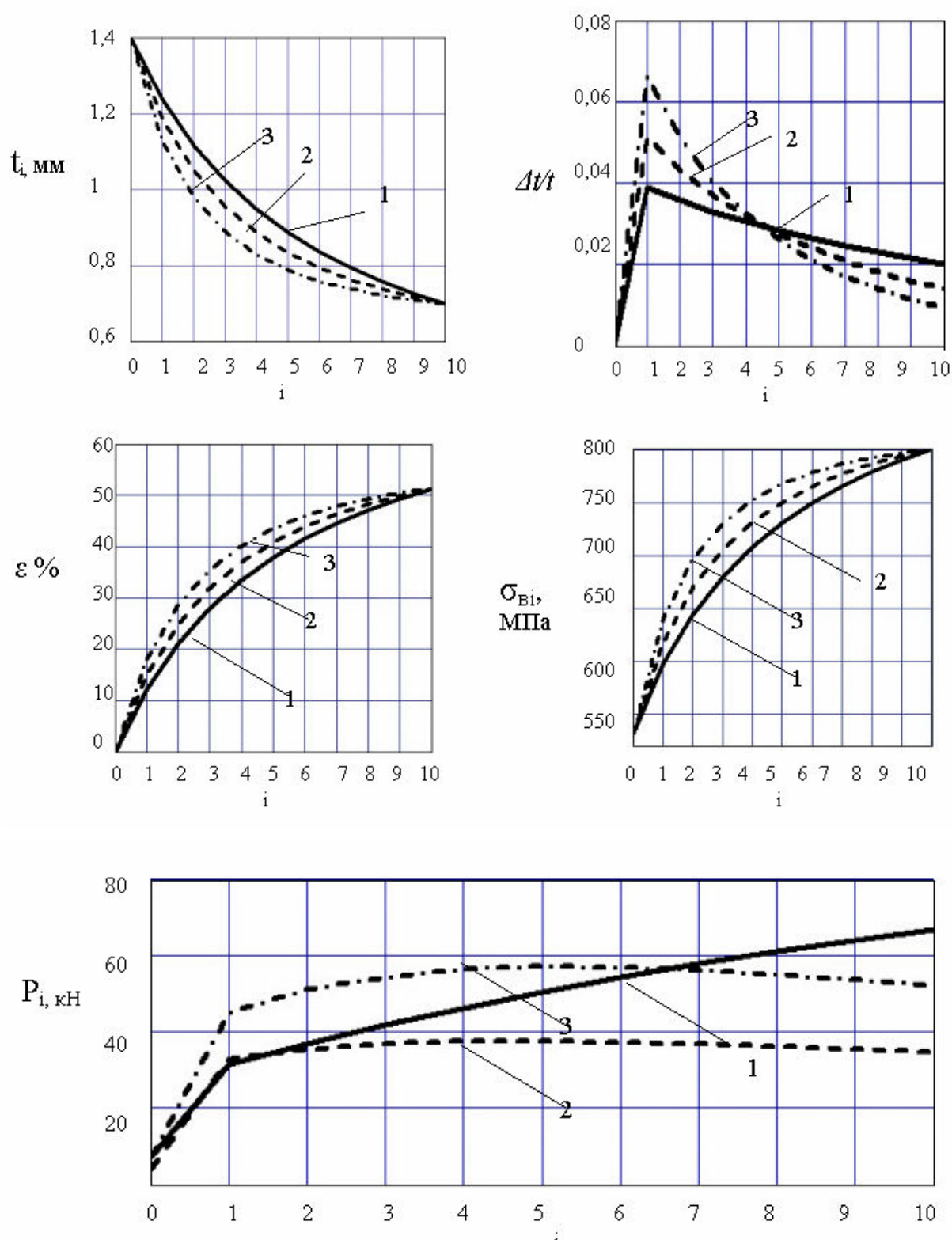


Рисунок 4 - Расчетное распределение основных параметров прокатки на стане ХПТР для стали 20 при трех значениях n

$n = 0,64$ (1- —); $1,1$ (2- ----); $1,5$ (3- - · - · -), i – номер контрольного сечения

Вывод. Впервые выполнен расчетно-аналитический анализ распределения деформационных и силовых параметров процесса ХПТР по длине участка обжатия стенки рабочего конуса. Из условия равномерного распределения силы прокатки по длине участка обжатия стенки можно рекомендовать для расчета калибровки инструмента при прокатке труб из стали типа 12X18H10T на станах ХПТР использовать $n = 2,0$, а для стали 20 $n = 1,0$.

Перспективы. Реализация математического описания с помощью ЕВМ по алгоритму «ХПТР- параметры» позволяет анализировать и определять рациональные параметры процесса ХПТР. Это приводит к возможности рассчитывать рациональные калибровки инструмента для прокатки конкретных марок сталей и сплавов, при конкретных маршрутах и условиях деформации. Проведенная разработка позволит также более точно рассчитывать рациональные параметры настройки рычажной системы привода каретки и сепаратора стана ХПТР.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Роликовые станы холодной прокатки труб» Вердеревский В.А. – М.: Металлургия, 1992. - 240 с.
2. Григоренко В.У. Холодная пильгерная прокатка труб: Учеб. пособ. - Днепропетровск: НМетАУ, 2006. - 48 с.
3. Ю.Ф. Шевакин «Калибровка и усилия при холодной прокатке труб» М.: Металлургия, 1963
4. Шевакин Ю.Ф., Сейдалиев Ф.С. Станы холодной прокатки труб:- М.: Металлургия , 1966. 211 с.
5. «Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением» Третьяков А.В., Зюзин Р.И. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

Получено 27.12.2007 г.

УДК 621.9.01

Б.Д. Даниленко, Ю.Г. Кравченко

ОПТИМІЗАЦІЯ УМОВ ТОЧІННЯ ВІДБІЛЕНИХ ЧАВУНІВ ПЛАСТИНАМИ ІЗ ПКНБ

Для розрахунку оптимальних параметрів процесу різання необхідно створити математичну модель, яка повинна складатися із системи залежностей показників процесу від змінних (тих, що підлягають оптимізації) параметрів, технічних обмежень (ТО) цих показників, області існування самих параметрів та цільової функції (ЦФ) в якості критерію оптимальності [1, 2]. Сучасна обчислювальна техніка та програмне забезпечення дозволяють вирішувати задачі багатфакторної оптимізації з економічною ЦФ методом нелінійного програмування.

Мета роботи – оптимізувати режимні та геометричні параметри процесу напівчистового та чистового точіння відбілених чавунів габаритними різальними пластинами із полікристалічного кубічного нітриду бора (ПКНБ).

Низьколеговані відбілені чавуни виконання з кульовидним КХН $HB = 330 - 400$ та пластинчатим ПХН $HB = 470 - 540$ графітом мають широке застосування для прокатних валиків та розмольних вальців.

Дослідження показників процесу різання виконувались збірними різцями [3, 4] високої жорсткості з регулюючим висуванням після заточки монолітної квадратної пластини $12,7 \times 12,7 \times 4,76$ мм із ПКНБ марки кіборіт та вставки з напайною пластиною на твердосплавній підложці $\varnothing 15,9 \times 4,76$ мм із ПКНБ ніборіт при незмінних кутах в плані $\varphi = \varphi' = 45^\circ$, задніх $\alpha = \alpha' = 8^\circ$, нахилу різальних кромek $\lambda = \lambda' = 8^\circ$ у квадратних та $\lambda = \lambda' = 0^\circ$ у напайних пластин.

Основу математичної моделі складали одержані емпіричні залежності показників процесу точіння від параметрів режиму різання (глибини t , подачі S , швидкості V), геометрії леза (переднього кута γ , радіуса вершини r , величини зносу по задній поверхні h) та твердості чавунів HB в зручному при розрахунках структурному виді.

Складові сили різання, H :

дотична $P_z = 883,8 \cdot t^{0,85} \cdot S^{0,68} \cdot V^{-0,15} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{0,6} \cdot (1 + r)^{0,15} \cdot (1 + h)^{0,6} \cdot (\frac{HB}{200})^{0,55}$;

радіальна $P_y = 369,2 \cdot t^{0,92} \cdot S^{0,60} \cdot V^{-0,11} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{1,4} \cdot (1 + r)^{0,23} \cdot (1 + h)^{1,5} \cdot (\frac{HB}{200})^{1,15}$;

осьова $P_x = 330,0 \cdot t^{1,0} \cdot S^{0,54} \cdot V^{-0,11} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{1,2} \cdot (1 + r)^{-0,19} \cdot (1 + h)^{1,3} \cdot (\frac{HB}{200})^{0,85}$.

Температура різання, °С

$$\theta = 426,8 \cdot t^{0,1} \cdot S^{0,19} \cdot V^{0,3} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{0,4} \cdot (1 + r)^{-0,2} \cdot (1 + h)^{0,6} \cdot (\frac{HB}{200})^{0,65}.$$

Період стійкості леза [5], хв

$$T = 29,26 \cdot t^{-0,3} \cdot S^{-0,75} \cdot V^{-1,55} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{-0,75} \cdot (1 + r)^{0,11} \cdot \tau(h) \cdot (\frac{HB}{200})^{-1,4} \cdot K_{iT},$$

де $\tau(h) = h \cdot (1 + 25,8 \cdot h - 27,8 \cdot h^2 + 8,0 \cdot h^3)$; $K_{iT} = 1$ для кіборіту та 0,75 для ніборіту.

Імовірність неруйнування різальної кромки [6]

$$P_T = \exp[-3,376 \cdot t^{0,1} \cdot S^{0,8} \cdot V^{0,3} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{-4,5} \cdot (1 + r)^{-0,4} \cdot p(h) \cdot (\frac{HB}{200})^{1,5} \cdot K_{iP}],$$

де $p(h) = h \cdot (1 - 3,44 \cdot h + 6,12 \cdot h^2 - 5,49 \cdot h^3 + 2,03 \cdot h^4)$; $K_{iP} = 1$ для кіборіту та 0,7 для ніборіту.

Висотний параметр шорсткості обробленої поверхні, мкм

$$R_a = 19,83 \cdot t^{0,1} \cdot S^{1,15} \cdot V^{-0,18} \cdot (1 - \frac{\gamma}{90})^{-0,1} \cdot (1 + r)^{-0,55} \cdot (1 + h)^{0,6} \cdot (\frac{HB}{200})^{-0,2}.$$

Для кожного з цих показників процесу точіння застосовувались наступні ТО.

Потужність різання з вимоги довговічності верстата не повинна перебільшувати три чверті потужності головного приводу

$$N = P_z \cdot V \leq 0,75 |N_n| \cdot \eta, \quad (1)$$

де η - к. к. д. передачі.

Деформація (стріла згину) державки різця g_1 обмежує дотичну складову

$$P_z \leq |f_i| \frac{3 \cdot E_i \cdot I_i}{10^6 \cdot L_i^3}, \quad (2)$$

де $I_i = \frac{B \cdot H^3}{12}$ - момент інерції перетину державки шириною B та висотою H ; E_i - модуль пружності матеріалу державки; L_i - виліт стрижневого різця.

Пружна деформація заготовки g_3 залежить від радіальної складової

$$P_y \leq |f_3| \frac{K_3 \cdot E_3 \cdot I_3}{10^6 \cdot L_3^3}, \quad (3)$$

де $I_3 = 0,05 \cdot D^4$ – полярний момент інерції перетину заготовки діаметром D ; E_3 – модуль пружності матеріалу заготовки; K_3 – коефіцієнт, який враховує спосіб закріплення заготовки в технологічній системі різання; L_3 – довжина заготовки.

Міцність механізму подачі верстата зв'язана з осьовою складовою нерівністю

$$P_x \leq 0,75 |P_{MT}|. \quad (4)$$

Температура різання повинна бути меншою критичної температуростійкості інструментального матеріалу

$$\theta \leq |\theta_T|. \quad (5)$$

Період стійкості для забезпечення раціональної експлуатації різального інструменту (РІ) повинен бути більшим нормативного

$$T \geq |T_H|. \quad (6)$$

Імовірність неруйнування різальної кромки за період стійкості приймалась відповідно допустимому значенню імовірності безвідмовної роботи простих технічних систем, що не обслуговуються

$$P_T \geq |P_T|. \quad (7)$$

Площа обробленої поверхні $F_o = 600 \cdot S \cdot V \cdot T \cdot P_T$ повинна перевищувати площу поверхні заготовки $F_3 = \pi \cdot D \cdot L \cdot n_n / 100$ (n_n – кратне число проходів)

$$F \geq |F_3|. \quad (8)$$

Параметр шорсткості призначається відповідно нормам технологічного забезпечення вимогам креслення деталі

$$R_a \leq |R_a|. \quad (9)$$

Границі значень параметрів, що оптимізуються, складають область існування режимних та геометричних параметрів

$$X_i \min \leq |t, S, V, \gamma, r, h| \leq X_i \max \quad (10)$$

Всі необхідні дані для розрахунку ТО (1) – (10) містить табл. 1.

Ефективність експлуатації РІ найбільш комплексно оцінюється змінними складовими технологічної собівартості обробки $C_T = E_g + E_i + E_e$, основні затрати якої зв'язані з амортизацією верстата та заробітною платою робітника – верстатника (E_g), експлуатацією інструмента (E_i) та витратою силової енергії (E_e). Тому ЦФ оптимізаційної моделі була прийнята питома собівартість обробки [7]

$$C_n = \frac{(1 + \varepsilon + \frac{\tau_i}{T \cdot P_T}) \cdot K_0 \cdot b_x + \frac{I + 3}{T \cdot P_T} + [N + Nn(1 + \varepsilon)(1 + Kn - \eta)] \cdot b_e}{60 \cdot t \cdot S \cdot V}. \quad (11)$$

Формула (11) включає вартість верстатохвилини роботи верстата та робітника

$$e_x = \frac{B_B \cdot a_B}{60 \cdot \Phi_p \cdot K_{3B}} + \frac{3_P \cdot K_H}{60 \cdot \Phi_M}, \quad (12)$$

належну на один період стійкості вартість РІ (пластини)

$$I = \frac{C_i \cdot K_{e3}}{(1 + i) \cdot n_e} \quad (13)$$

та вартість заточки

$$3 = \frac{\tau_3 \cdot B_3 + \frac{C_K}{i_K}}{n_6}. \quad (14)$$

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку ТО

Найменування та розмірність елементів технічних обмежень	Значення	
	ніборіт, напівчистова обробка	кіборіт, чистова обробка
Оброблювана заготовка – представник: діаметр та довжина оброблюваної поверхні $D \times L$, мм	200 x 750	
загальна довжина валу L_3 , мм	1500	
коефіцієнт способу закріплення заготовки (в патроні з підтримкою заднім центром) K_3	110	
прогин заготовки $ f_3 $ (3), мм	0,02	0,01
модуль пружності чавуну E_3 , Па	$130 \cdot 10^9$	
число проходів різця за період стійкості n_n	1	
площа поверхні обробки F_3 (8), см І	5890	
параметр шорсткості $ R_a $ (9), мкм	5	2,5
Токарний верстат: потужність головного приводу $ N_n $ (1), Вт	15000	
к. к. д. передачі η	0,85	
зусилля механізму подачі $ P_{МП} $ (4), Н	9000	
Різальний інструмент - прохідний різець: перетин державки $B \times H$, мм І	32 x 40	
довжина вільоту L_i , мм	75	
згин державки $ f_i $ (2), мм	0,02	0,01
модуль пружності сталі E_i , Па	$130 \cdot 10^9$	
температуростійкість ПКНБ $ \theta_T $ (5), °С	1000	
нормативний період стійкості $ T_n $ (6), хв	45	60

імовірність неруйнування $ P_T $ (7)	0,8	0,85
Границі пошукових параметрів (10):		
глибина t , мм	1 - 2	0,5 - 1
подача S , мм/об	0,1 - 0,5	
швидкість V , м/с	0,5 - 2,5	
передній кут γ , град	(-30) - 0	
радіус вершини r , мм	0,8 - 3,2	0,8 - 1,6
величина зносу h , мм	0,2 - 0,8	

Кількість заточок пластини в (13) визначається із виразу

$$i = B_i \cdot K_B \frac{[P_T(K_p - 1) + 1] \cdot \delta + \Delta}{(K_p \cdot \delta + \Delta)(\delta + \Delta)}, \quad (15)$$

де $\delta = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}$ - величина природного зносу леза в основній

площині в напрямку головної січної площини.

Найменування та значення складових C_n (11) приведені в зведений табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку C_n

Найменування та розмірність елементів собівартості обробки	Значення	
	ніборіт	кіборіт
Затрати часу на технологічні переходи ε	0,15	
Час на зміну та настройку інструмента τ_i , хв.	2	
Затрати часу на обслуговування верстата K_o	1,07	
Вартість токарного верстата B_B , п. г. о.	30 000	
Норма амортизаційних відрахувань a_B	0,075	
Річний фонд часу двозмінної роботи Φ_p , год	4015	
Коефіцієнт завантаження верстата K_{ze}	0,85	
Місячна зарплата верстатника $З_p$, п. г. о.	500	
Коефіцієнт надбавки K_n	1,2	
Місячний фонд робочого часу Φ_m , год	164	
Вартість верстатохвилини обробки b_x (12), $\frac{\text{п.г.о.}}{\text{хв}}$	0,072	
Ціна різальної пластини C_i , п. г. о.	30	50
Коефіцієнт випадкових збитків $K_{\text{вз}}$	1,15	
Ширина пластини в напрямку заточки B_i , мм	14	12,7 / 2
Коефіцієнт використання пластини K_B	2 / 3	1 / 3
Коефіцієнт перевищення глибини руйнування леза над величиною зносу δ (15) K_p	4	
Технологічний припуск на заточку Δ , мм	0,1	

Число вершин пластины n_6	1	4
Штучний час на заточку τ_3 , хв.	5	10
Вартість заточного верстата B_3 , п. г. о.	6900	
Норма амортизаційних відрахувань a_3	0,103	
Місячна зарплата заточника $З_3$, п. г. о.	500	
Вартість верстатохвилин заточки e_x (12), $\frac{\text{п.г.о.}}{\text{хв}}$	0,064	
Ціна заточного (алмазного) круга $Ц_K$, п. г. о.	200	
Число заточок одним кругом i_K	200	75
Вартість заточки $З$ (14), п. г. о.	1,32	0,82
Затрати потужності на привод подачі та допоміжних механізмів K_n	0,2	
Вартість електроенергії e_e , $\frac{\text{п.г.о.}}{\text{Вт} \cdot \text{хв}}$	$3,33 \cdot 10^{-6}$	

Результати розрахунків, виконаних на ПЕОМ з використанням програмного продукту Mathcad, зведені в табл. 3.

Додатковими оціночними показниками при аналізі ефективності процесу точіння в залежності від умов обробки служили продуктивність обробки

$$Q = 60 \cdot t \cdot S \cdot V \quad (16)$$

та ресурс різальної пластины

$$R = T \cdot P_T \cdot (1+i)n_6. \quad (17)$$

Таблица 3

Оптимальні параметри процесу точіння

Призначення операції, марка ПКНБ	Твердість чавуну, HB	Твердість різання			Геометрія леза			Оціночні показники		
		t	S	V	γ	r	h	Q	R	C_n
		мм	мм/об	м/с	град	мм	мм	см ³ /хв	хв	п.г.о./с м ³
напівчистове точіння, ніборіт	400 540	2	0,5	1,4 2 1,0 4	-11,4 -19,8	3,2	0,8	85,1 62,4	1445 1462	0,0022 0,0030
чистове точіння, кіборіт	400 540	1	0,24 0,25	2,1 9 1,5 5	-19,7 -28,9	1,6	0,8	31,5 23,2	2099 2120	0,0051 0,0069

При прийнятих вихідних даних для ТО (табл. 1) та C_n (табл. 2) гранично обмеженими показниками процесу виявилися T , P_T та R_a , що вказує на повне використання експлуатаційних властивостей ПКНБ. Розрахункові величина зносу леза в основній площині та кількість заточок (15) відповідали $\delta = 0,104 - 0,109$ мм, $i = 39,1 - 39,6$ для

різцевої вставки із ніборіту та $i=9,3-9,4$ для пластини із кіборіту з $n_g = 4$.

Загальна тенденція забезпечення найменшої C_n полягає в застосуванні максимально допустимих глибин t , радіуса r та величини зносу в площині різання h .

Зі збільшенням твердості чавунів відмічається суттєве зменшення швидкості V та переднього кута γ , а при чистовому точінні в порівнянні з напівчистовим – значне зниження подачі S , збільшення швидкості V та зменшення переднього кута γ . В цілому збільшення твердості HB з 400 (HRC_э = 43) до 540 (HRC_э = 53) призводить до зниження продуктивності обробки Q (16) в 1,35 раза, збільшення ресурсу пластин R (17) в 1,01 раз та питомої собівартості обробки C_n в 1,36 раз. В порівнянні з напівчистовим точінням при чистовому через більш жорсткі T , P_T , R_a відбувається зниження Q в 2,69 раз та збільшення в 1,45 та 2,31 разів відповідно R та C_n .

Розрахункові режими різання та геометрія леза пластин табл. 3 пройшли апробацію в виробничих умовах і рекомендуються до впровадження.

Важливим достоїнством даної методології розрахунку є її здатність оптимізувати геометричні параметри леза та по економічно обґрунтованій величині зносу h (як аргумента функцій періода стійкості T , імовірності неруйнування різальної кромки P_T та кількості можливих заточок i) забезпечити максимальний ресурс кошовних пластин із ПКНБ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Якобс Г.Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания: Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1981.- 279 с.
2. Кравченко Ю.Г., Пиньковский С.Г., Савченко Ю.В. Постановка задачи оптимизации параметров процесса резания металлов.- Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч. – техн. сб.- Харьков: НТУ «ХПИ», 2005.- Вып.68.- С. 273-276.
3. Кравченко Ю.Г., Архипов О.В. Сборный резец с перетачиваемой пластиной. – А.с. 1710 203, БИ, М.: НИИПИ, 1992, №5.
4. Кравченко Ю.Г., Архипов О.В. Сборный резец.- А.с. 1773 573, БИ, М.: НИИПИ, 1992, №41.
5. Кравченко Ю.Г., Савченко Ю.В. Надёжность режущих пластин из композитов при точении отбеленных чугунов.- Високі технології в

- машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ».- Харків, 2005.- Вип. 1 (10).- С. 99-104.
6. Кравченко Ю.Г. Вероятность неразрушения режущей кромки пластин из композитов.- Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.- техн. сб.- Харьков: НТУ «ХПИ», 2007.- Вып.73. - с. 118-123.
 7. Кравченко Ю.Г., Савченко Ю.В. Расчёт удельной себестоимости обработки при точении.- Сбор. науч. трудов НГУ №19, том 4 - Дн-ск: Национальный горный университет, 2004.- С. 88-91.

Получено 16.01.2008 г.

УДК 664.2.032.1

А.М. Павленко, А.А. Чейлытко

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ВИХРЕВЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ КАМЕР С ПОДВИЖНОЙ ЗОНОЙ ВСКИПАНИЯ

В статье предложены физическая и математические модели, которые использовались при проектировании вихревых испарительных камер для разделения многокомпонентных сред.

Для проектирования вихревых испарительных камер необходимы обстоятельные теоретические и экспериментальные исследования аэродинамики закрученного потока с учетом подвода массы среды. В основу исследований следует заложить модель течения жидкости в вихревой камере [1] и проанализировать возможность использования этих результатов для описания вскипающих вихревых потоков.

В исследованиях [2] указано, что относительные вращательные скорости при повышении температуры (при горении солярового масла) возрастают в 1,5 раза относительно скорости холодного потока. Осевые скорости увеличились в 4 раза. Относительные величины полного и статического давления для нагретой камеры выше, чем для холодной. В то же время качественная картина в камере сохранилась без существенных изменений.

Рассмотрим вначале физическое представление процесса вихревого течения вскипающей жидкости, при этом будем основываться на физической модели холодного потока, представленной в работе [3].

На рисунке 1 представлена схема вскипающего потока. Вследствие взаимодействия вдоль границы a_1 , a_2 , a_3 на участке спутного течения из-за скачкообразного изменения скорости в сечении a_1 , a_3 , поток дробится на вихревые жгуты, вытянутые по поверхностям, параллельным оси потока. Вихревая модель турбулентного слоя смешения подробно рассмотрена также в работе [4]. Образовавшаяся структура начинает двигаться под действием радиального перепада давления.

В целом вскипание в потоке происходит в том случае, когда локальное давление становится ниже величины насыщения при соответствующей температуре насыщения. Если в устройстве предусмотрено глобальное снижение давления, то жидкость испаряется полностью. При анализе результатов исследований [5] традиционно принята многостадийная модель вскипания перегретой жидкости. На первой стадии генерируются паровые пузырьки, сливающиеся затем в трубки тока, которые ускоряются в большей степени, чем основной поток. Чем больше градиент давления, тем более четко проявляются эти стадии вскипания. Предлагаемая модель описывает вскипающий поток без учета обратимости. Применение такого подхода к безградиентному течению идеализировало бы решение.

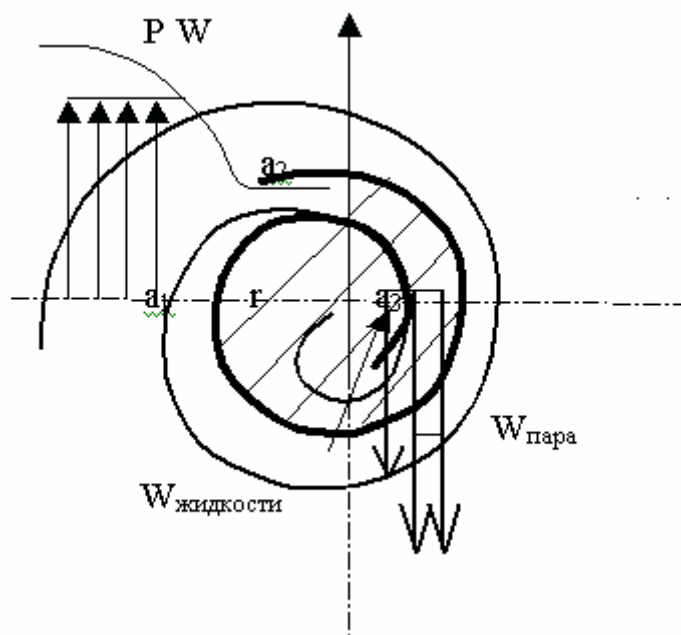


Рисунок 1 - Расчетная схема (заштрихована область двухфазного течения)

Но поскольку вихревое движение возможно при значительном градиенте давления, допущение о необратимости оправдано и модель не противоречит гидродинамическим и термодинамическим законам. Таким образом, обращаясь к рисунку 1, можно выделить три зоны однофазного и двухфазного течений. При падении давления до P_n образуется пар, который течет в виде отдельных трубок без трения, теплообмена и перемешивания. При увеличении объема среды и снижении плотности очевиден скачек скорости. Трубки тока характеризуются изоэнтропийным течением. Температура и скорость

в сечении трубок не изменяются. При дальнейшем падении давления образуются новые трубки тока пара, количество жидкости уменьшается. В случае достаточно высокого перегрева, жидкость испаряется полностью. Неиспарившаяся часть в трубке тока распределена в виде капель и движется с той же скоростью, что и пар. Процесс испарения внутри вихря удобно представить на I-S диаграмме (рисунок 2).

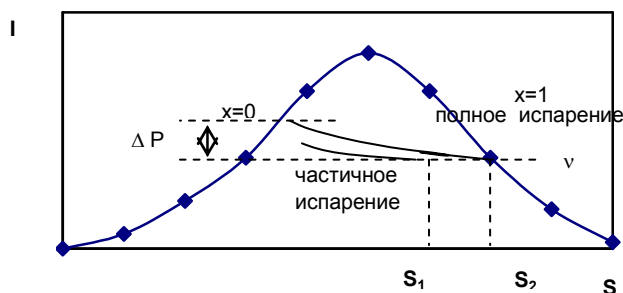


Рисунок 2 – Представление процесса вскипания на I-S – диаграмме

Используя основные термодинамические соотношения, можно записать равенство, которое следует из диаграммы:

$$\Delta p = (\Delta I' - T \Delta S) \rho' = S v \rho'.$$

Это уравнение взято за основу при дальнейшей разработке модели испарения и также в полной мере характеризует представленную физическую модель вскипающего потока: при вскипании жидкости образуется цилиндрическая зона парообразования, в которой насыщенность паром возрастает при приближении к радиусу вихря по мере падения давления. Степень испарения и конечная величина давления определяется уровнем перегрева в предположении, что размер выходного отверстия соответствует массовому расходу среды. Следуя приведенному представлению течения фаз, их скорости различаются внутри вихревого потока. Примем, что при увеличении паросодержания скорости фаз приближаются по своим значениям и в сопле выравниваются.

Математическое представление вскипания жидкости в вихре

Предложенная выше физическая модель процесса вскипания перегретой жидкости в вихревых аппаратах может быть представлена следующей системой уравнений для области основного вихря:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = K \rho M_K^2 \frac{W^2}{r}; \\ PV \frac{d(rW)}{rdr} = \frac{1}{k} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rW)}{dr} \right) + \gamma(r)W; \\ \frac{\rho}{r} \frac{d(rV)}{dr} = -\gamma(r); \\ \rho = const; \\ \gamma(r) = A_1 + A_2 r^\alpha; \\ При \left[\begin{array}{l} r = 1, V = -1; W = 1; \rho = const; \\ r \rightarrow 0, rW = 0 \end{array} \right], \end{array} \right. \quad (2)$$

где P -давление; r -радиус вихря; K -показатель адиабаты; M_K -число Маха; W -окружная скорость; V -радиальная скорость; $\gamma(r)$ – скорость отвода массы, представленная в виде ряда с коэффициентами A_1, A_2 , и показателем степени α ; ρ - плотность.

Течение в области вихрестока можно представить следующей математической моделью:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial r} \left(\frac{B}{M_K} \right)^2 \frac{1}{K} = \frac{4}{3k} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rV)}{dr} \right) + \gamma(r)V - V \frac{dV}{dr} + B^2 \frac{W^2}{dr}; \\ V \frac{d(rW)}{rdr} = \frac{1}{k} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rW)}{dr} \right) + \gamma(r)W; \\ \frac{1}{r} \frac{d(rV)}{dr} + \frac{dV}{dz} = -\gamma(r); \\ U \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{K} \left(\frac{B}{M_K} \right)^2 \frac{\partial P}{\partial z} + \gamma(r)U, \\ \rho = const; \\ \gamma(r) = A_1 + A_2 r^\alpha; \\ При \left[\begin{array}{l} r = 1, V = -1; W = 1; U = 0; P = 1 \\ z = 0, U = 0 \\ r = 0, rW \rightarrow 0; V = 0; U = const. \end{array} \right], \end{array} \right. \quad (3)$$

где z – координата по оси вихревой камеры.

На рисунке 3 показано совмещенное решение (2) и (3) для вскипающего и «холодного» потоков. Графические зависимости иллюстрируют предложенное физическое представление процесса вскипания жидкости в вихре и согласуются с экспериментальными данными работы [3].

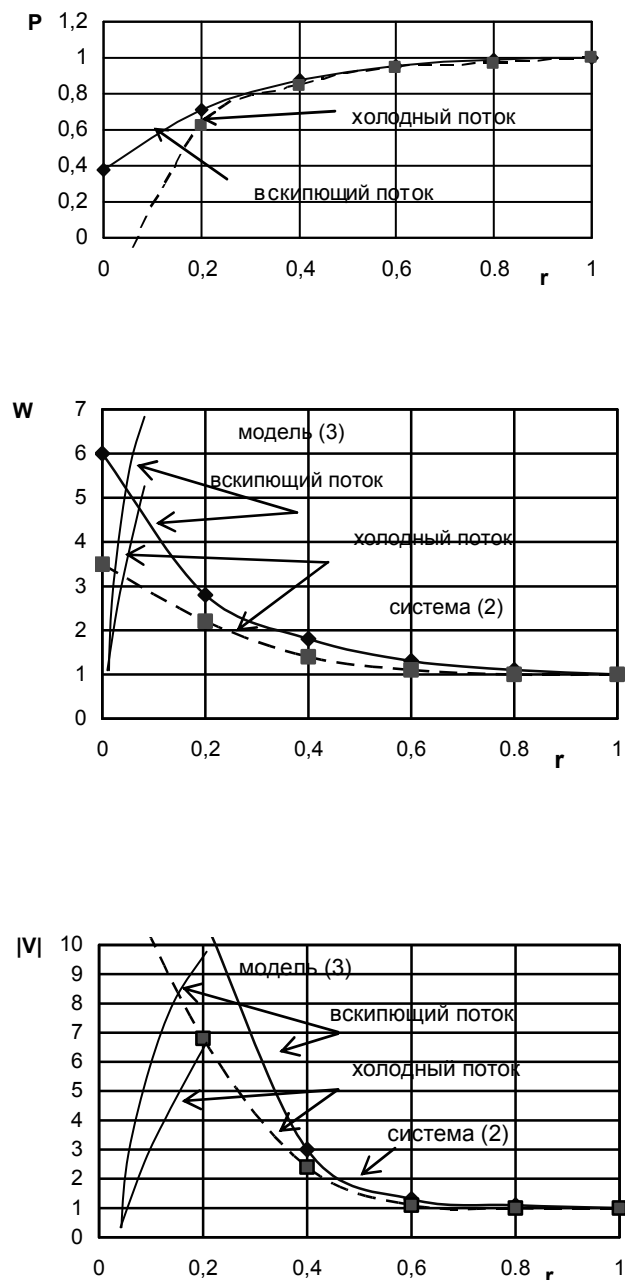


Рисунок 3 – Решение уравнений (2) и (3)

Приведенные математические модели могут быть заложены в основу расчета и проектирования вихревых контактных аппаратов или вихревых устройств, в которых масса потока переменна, например, аппаратов для термического разделения эмульсий [6]. Учитывая опыт эксплуатации таких устройств, следует отметить, что, как правило, в области вихрестоя процесс парообразования практически завершен. Поэтому для многих случаев можно принять

без существенной погрешности расчета $\gamma(r)=0$ в системе уравнений (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко А.М. Стійкість емульсій при технологічних впливах. - Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2000. - 140 с.
2. Коваль В.П., Михайлов С.Л. Гидродинамические характеристики центробежной форсунки// Теплоэнергетика, №5, 1972.
3. Вулис Л.А., Устименко Б.П. О влиянии неизотермического поля на аэродинамику потока в циклонной топочной камере// Теплоэнергетика, №4, 1956. - С.37.
4. Калишевский Л.А. Структура потока и аэродинамические характеристики циклонной камеры при горении// Теплоэнергетика, №2, 1958. - С.20.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974.- 711с.
6. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. - 592 с.

Получено 31.01.2008 г.

УДК 620.179.14

А.Н. Петренко, А.Е. Кучеренко

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Введение

Одна из главных задач дефектоскопии – получение данных о внутренней структуре исследуемого объекта. Проблема состоит в исследовании структуры объекта, сравнении его с эталонными значениями, определении аномалий в структуре контролируемого объекта, их локализации.

Электроимпедансная томография (ЭИТ) - методика, позволяющая визуализировать пространственное распределение электрического импеданса внутри объекта, в частности, внутри тела человека по результатам неинвазивных электрических измерений [1]. Для реконструкции изображения используются значения электрического потенциала, измеренные на поверхности объекта при пропускании через него тока. Практическая реализация метода требует разработки быстрого и эффективного алгоритма реконструкции и создания измерительной аппаратуры, обеспечивающей высокую точность электрических измерений.

Алгоритмы, предназначенные для реконструкции изображений по данным ЭИТ, отличаются высокой ресурсоёмкостью и низкой скоростью работы. В то же время результат работы менее ресурсоемких алгоритмов оставляет желать лучшего [2].

Альтернативный подход в решении задачи реконструкции изображений ЭИТ - использование нейронных сетей (НС). Использование нейросетевых методов позволяет упростить процесс восстановления изображения по данным электроимпедансных измерений. При этом повышается скорость и точность решения обратной задачи ЭИТ.

Обратная задача ЭИТ

Общий подход в решении некорректных задач состоит в замене исходной задачи схожей, но более корректной задачей. При этом новая задача требует меньше информации для решения или же

заранее известны дополнительные данные. Например, в некоторых приложениях ЭИТ известно, что исследуемый объект состоит из нескольких материалов с определенной проводимостью. Подобное сочетание материалов приводит к тому, что проводимость будет находиться в заранее известных границах. Такое условие сразу же ограничивает спектр возможных решений [3].

Цель решения обратной задачи ЭИТ состоит в определении внутренней структуры исследуемого объекта путем измерения разницы потенциалов на поверхности объекта. Другими словами, необходимо определить границы участков с различной проводимостью внутри объекта. Математически задача ЭИТ описывается следующей системой уравнений [2]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \phi) = 0 \\ \sigma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega} = J, \\ \phi \Big|_{\partial \Omega} = U_J^0 \end{cases} \quad (1)$$

где Ω - область исследования, $\partial \Omega$ - граница Ω , ϕ - функция распределения напряжения в области Ω , σ - функция неизвестной проводимости, J - плотность возбуждающего тока, исходящего с активного электрода, U_J^0 - функция распределения напряжения на границе Ω . Если функция $\sigma(x, y)$ известна, то задача нахождения $\phi(x, y)$ в любой точке области Ω является прямой задачей ЭИТ. Для ее решения наибольшее распространение получил метод конечных элементов. Если же по известным значениям U_J^0 необходимо вычислить $\sigma(x, y)$, то это - обратная задача ЭИТ, которая является нелинейной и некорректной, что значительно осложняет ее решение. Решение обратной задачи ЭИТ возможно, если выполняются следующие условия: 1) измерения производятся в среде, в которой нет участков с нулевой или бесконечной проводимостью; 2) примерно должны быть известны граничные значения проводимостей.

В настоящее время для решения обратной задачи ЭИТ предложены следующие алгоритмы [2]:

1. Алгоритм обратной проекции. Основным недостатком алгоритма состоит в том, что при его использовании возможна реконструкция

изображений объектов, имеющих округлую геометрию, само же изображение строится относительно геометрического центра.

2. Статическая реконструкция изображений. Алгоритм очень чувствителен к ошибкам позиционирования электродов на поверхности объекта, что в свою очередь ведет к существенным ошибкам в измерениях. Вследствие этого экспериментальные данные и данные, полученные в результате эмуляции, имеют сильные расхождения.

3. Алгоритм дифференциальной реконструкции изображений (АДР). Получил наибольшее распространение вследствие относительной простоты и высокой скорости работы. Этот алгоритм реконструкции существенно уменьшает влияние многочисленных ошибок измерения, т.к. изменение проводимости вычисляется в соответствии с изменениями в измерениях. Прямая задача описывается линейным уравнением

$$u = Hy, \quad (2)$$

где u – измеренные потенциалы на электродах, σ – проводимость, H – якобиан, описывающий линейное отношение между u и σ , имеющий вид

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial \sigma_1} & \dots & \frac{\partial v_1}{\partial \sigma_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial v_m}{\partial \sigma_1} & \dots & \frac{\partial v_m}{\partial \sigma_m} \end{bmatrix}$$

Предполагается, что $v_i = u_i$, т.к. электроды считаются идеальными проводниками. Выражение (2) преобразуется к виду

$$\Delta u = H \Delta \sigma, \quad (3)$$

где Δu – изменение потенциалов на электродах, $\Delta \sigma$ – изменение проводимости. Было доказано, что алгоритм, основанный на разностной схеме, достаточно устойчив к ошибкам в позиционировании электродов, главное, чтобы во время измерений положение электродов не изменялось. К недостаткам этого алгоритма относится линейная аппроксимация, что существенно ограничивает применение этого алгоритма [4].

4. Дифференциальная реконструкция изображений на основе максимальной апостериорной регуляризации. Это наиболее совершенный алгоритм, используемый в ЭИТ. Его основной недостаток состоит в значительном снижении пространственного

разрешения за счет специфической регуляризации обратной задачи [3], а также в крайне высокой ресурсоемкости.

Нейросетевой метод решения обратной задачи ЭИТ

Для регуляризации плохо обусловленных задач в [5] предложено использовать нейросетевую структуру, которая по очевидным причинам названа сетью регуляризации. По мнению авторов, подобные сети являются универсальными аппроксиматорами, обладающие свойством наилучшей аппроксимации и обеспечивающие оптимальное решение. Построение сети регуляризации является крайне ресурсоемким в вычислительном смысле. В качестве сетей регуляризации возможно использовать как статические сети (многослойные нейронные сети с обратным распространением ошибки), так и рекуррентные динамические [5]. Единственной трудноразрешимой проблемой в случае решения обратной задачи ЭИТ является высокая размерность входных и выходных данных, вследствие чего моделирование таких сетей представляет значительные трудности даже на современных рабочих станциях. Прежде всего, встает вопрос о времени, которое необходимо для обучения сети. Так, в [6] приведены данные о применении многослойного персептрона для решения обратной задачи ЭИТ. Однако авторам удалось добиться приемлемого функционирования сети лишь для изображений с низким разрешением. Альтернативный вариант – использование сетей на основе радиальных базисных функций (РБФ), которые обеспечивают субоптимальное решение плохо обусловленных задач. Сеть на основе РБФ представляет собой нейронную сеть с одним скрытым слоем. В качестве передаточной функции нейронов скрытого слоя используется функция Гаусса. Передаточная функция нейронов выходного слоя линейная. Следует отметить, что обучение сети на основе РБФ происходит на порядок быстрее статических и, тем более, динамических сетей.

Проблема реконструирования изображений ЭИТ рассмотрена для шестнадцатиелектродной измерительной системы с полярной инжекцией тока. Геометрия исследуемого объекта – цилиндрическая, при этом исследуемый срез разделен на 576 элементов для повышения точности реконструирования изображения (рис. 1).

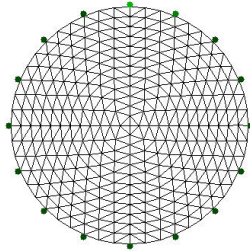
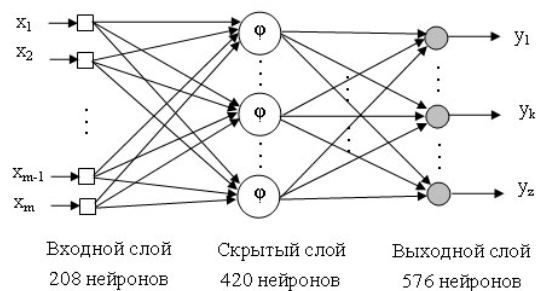


Рисунок 1 – Гомогенная среда. Показано разделение на 576 элементов и приложения электродов по границе области

Качество визуализации с помощью нейронной сети сравнивалось с результатами реконструирования по алгоритму дифференциальной реконструкции изображения, получившего наибольшее распространение для решения данной задачи.

Для обучения нейронной сети использовался набор данных, сгенерированный с помощью двумерной модели конечных элементов для уравнения Лапласа [7]. Количество образцов для обучения 400. Каждый образец содержал 208 независимых измерений напряжений. Таким образом, для обучения сети использовался массив данных размером 208x400 элементов. Следует отметить, что наиболее эффективное обучение нейронной сети на основе РБФ происходило в случае раннего прерывания обучения. Если же обучение проходило до конца, то сеть могла лишь реконструировать изображения, использованные в процессе обучения, т.е. теряла способность к обобщению. Раннее прерывание происходило в момент, когда значение среднеквадратичной ошибки обучения составляло 0.15, которое превосходило целевое значение ошибки 0.1 на 50%. Это соотношение подобрано экспериментальным путем. Параметры сети после обучения были следующими: количество нейронов во входном слое – 208, количество нейронов в скрытом слое – 420, в выходном – 576 (рис. 2).



Многомерная функция Гаусса

$$\varphi(x, x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \|x - x_i\|^2\right)$$

Рисунок 2 – Нейронная сеть на основе РБФ

На рис. 3 приведены примеры изображений распределения проводимостей, смоделированные с помощью двумерной модели конечных элементов и восстановленные с помощью нейронной сети и алгоритма дифференциальной реконструкции.

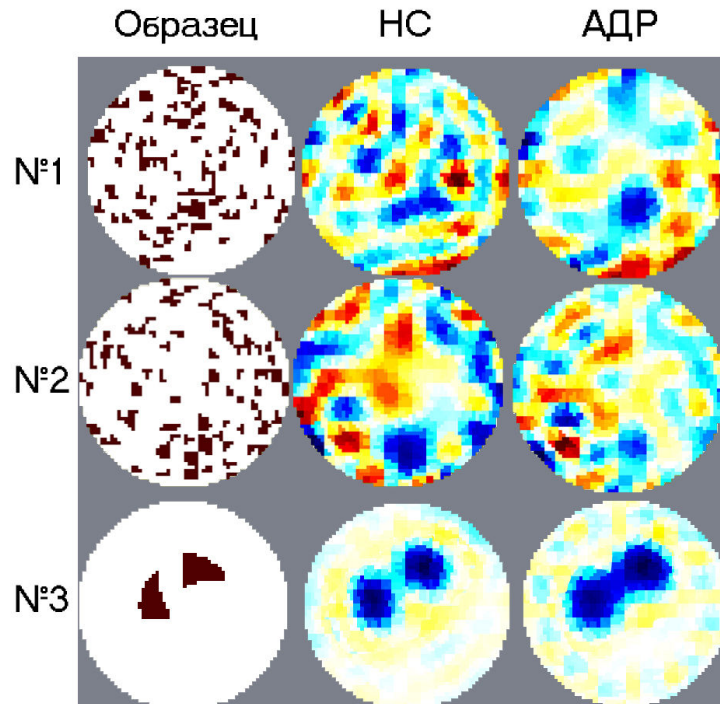


Рисунок 3 – Сравнение изображений распределения проводимостей, восстановленных с помощью НС и АДР

Для сравнения восстановленных изображений с оригиналами использовалось пиковое соотношение сигнал/шум (peak signal-to-noise ratio - PSNR), которое для двух изображений I_1 и I_2 вычислялось следующим образом

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{(M \cdot N)^2}{\sum_{M,N} (I_1(m,n) - I_2(m,n))^2}, \quad (4)$$

где M , N – размеры изображений. Область значений $PSNR \in [0; 100]$.

Структурное подобие восстановленных изображений оригиналам оценивалось с помощью метрики SSIM (structural similarity) [8], которая определялась следующим образом

$$SSIM = \frac{(\overline{2xy} + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{((\overline{x})^2 + (\overline{y})^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (5)$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние значения x и y ; σ_x , σ_y – среднеквадратичные отклонения x , y ; σ_{xy} – ковариация x и y ; C_1 и C_2 – константы, равные соответственно 6.5 и 58.5. Область значений $SSIM \in [-1; 1]$.

Для определения сравнительных характеристик использовалась выборка из 100 образцов, которые случайным образом выбраны из совокупности объемом в 1000 образцов, сгенерированных с помощью двумерной модели конечных элементов. Среднее значение PSNR для изображений, восстановленных с помощью НС 17 дБ; для изображений, восстановленных с помощью АДР, составляет 15 дБ. Таким образом, изображения, полученные с помощью НС в большей степени соответствуют оригинальным. На этих изображениях меньше областей с некорректно восстановленной проводимостью. Среднее значение SSIM для изображений, восстановленных с помощью НС 0.30; для изображений, восстановленных с помощью АДР, составляет 0.26. НС более корректно восстанавливает структуру изображения.

На рис. 4 приведены изображения распределения проводимостей, восстановленные с помощью НС и АДР по экспериментальным данным. Объект исследования – металлический цилиндрический стержень, внутри которого находятся включения. Исследование проведено для двух сечений.

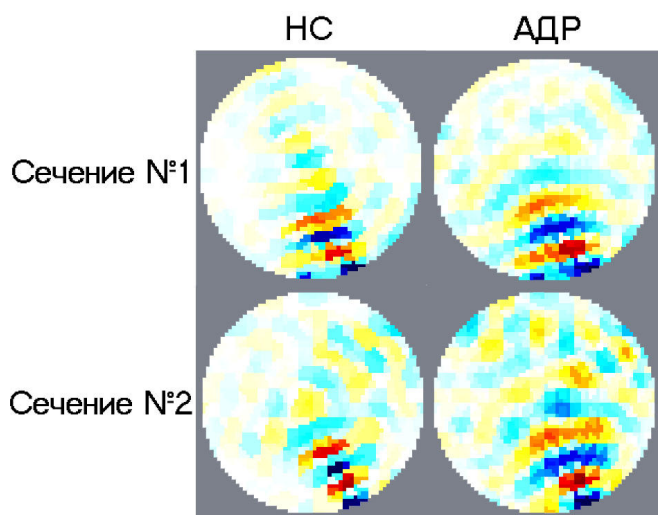


Рисунок 4 – Изображения распределения проводимостей сечений металлического стержня, восстановленные с помощью НС и АДР

Заключение

Применение нейронных сетей для решения плохо обусловленных задач – эффективный метод, который позволяет с высокой точностью получать решение. Так, при реконструкции изображений по данным

ЭИТ с использованием НС на основе РБФ точность результата превышает таковую у традиционных алгоритмов, использование НС позволяет получать более детальное изображение. Кроме того, НС устойчивы к искажениям данных вследствие шумов.

Таким образом, применение НС на основе РБФ для реконструкции изображений ЭИТ позволяет повысить точность и скорость вычислений, а также снижает требования к вычислительной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Williams R.A., Beck M.S. Process Tomography: Principles, Techniques and Applications. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1995.
2. Lionheart W.R.B. Reconstruction algorithms for permittivity and conductivity imaging. Proceedings of the 2nd congress on industrial process tomography, pp. 4-11, 2001.
3. Betrero M., Boccacci P. Introduction to inverse problems in imaging. IoP, Bristol, 1998.
4. Barber D.C., Brown B.H. Errors In Reconstruction of Resistivity Images Using a Linear Reconstruction Technique. Clin. Phys. Physiol. Meas., 9(A), 101-104.
5. Poggio T., Girosi F. Regularization algorithms for learning that are equivalent to multilayer networks. Science, 1990, vol. 247, p. 978-982.
6. Netajatali A., Ciric I.R. An Iterative algorithm for electrical impedance imaging using neural networks // IEEE Trans. Magn. – 1998. – V. 34. – P. 2940-2943.
7. Adler A., Lionheart W.R.B. Uses and abuses of EIDORS: An extensible software base for EIT. Physiol. Meas. 27:S25-S42, 2006.
8. Wang Z., Bovik A.C. A Universal Image Quality Index. IEEE Signal Processing Letters, vol. 9, pp. 81-84, March 2002.

Получено 29.02.2008 г.

УДК 664.2.032.1

Ю.Н. Сергеева, В.Е. Черниченко, А.Д. Горбунов

ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ВОДОМАЗУТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Введение. Понятие экологизации технологий производства состоит в проведении мероприятий, направленных на предотвращение отрицательного воздействия производственных процессов на окружающую среду. В отношении применения жидких топлив, являющихся основными составляющими в балансе потребления при производстве энергии, экологизация означает предотвращение выбросов в атмосферу образующихся при сжигании различных вредных веществ, а также предотвращение загрязнения гидросферы и литосферы сточными водами, содержащими нефтепродукты.

В настоящее время природоохранные мероприятия, проводимые на действующих ТЭС и котельных, направлены на снижение выбросов оксидов азота, оксида углерода, а также оксидов серы. Многие широко применяемые сейчас методы организации процесса сжигания топлив преследуют цель подавления образования NO_x : ступенчатое сжигание, рециркуляция дымовых газов, сжигание топлива при пониженных избытках воздуха.

Выполненные нами исследования показывают, что одной из таких технологий для теплоэнергетики, направленной на защиту атмосферного воздуха от выбросов различных ингредиентов NO_x , CO , сажи, многоядерных углеводородов и других вредных веществ является сжигание мазута в виде водомазутных эмульсий (ВМЭ).

Постановка задачи. Методы сжигания водомазутной эмульсии широко известны. В исследованиях, посвященных этому вопросу [1...4], установлено, что для достижения поставленной задачи ВМЭ должна быть приготовлена в виде однородной смеси мазута и добавляемой влаги по типу "вода-масло", в которой вода как дисперсная фаза в виде частиц диаметром несколько микрометров находится внутри топливной оболочки. Повышенная эффективность процесса горения эмульсии (даже при предельно низких избытках воздуха) обусловлена микровзрывом ее капель вследствие различия температур кипения воды и мазута. При дополнительном дроблении капель эмульсии достигается ускорение их испарения и улучшается

процесс перемешивания топлива с воздухом, в результате чего с учетом наличия в зоне горения продуктов диссоциации воды процесс сгорания мазута существенно интенсифицируется. Эти особенности сжигания водотопливной эмульсии в литературных источниках представлены только качественно. Поэтому целью данной работы является поиск функциональной взаимосвязи влияния различных факторов и параметров эмульсии на количество NO_x в отработанных газах.

Метод исследования и результаты. С помощью физико-химических методов анализа продуктов сгорания топлива можно определить их количественный состав. Для реализации этой методики измерения используют прибор «Газохром 3201», который фиксирует в отработанных газах наличие NO_x , CH_4 , CO , CO_2 и т.п.

Обработку полученных данных по содержанию NO_x в продуктах сгорания водо-мазутной эмульсии с добавками дизельного топлива производили с использованием методов планирования экспериментов. Принимаем, что NO_x определяется отношением содержания мазута к содержанию воды, содержанием дизельного топлива, выдержкой эмульсии и коэффициентом избытка воздуха. Условия экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Условия экспериментов

Фактор	Код	Уровни варьирования					Интервал варьирования, Δ
		-1,414	1	0	1	+1,414	
Отношение содержания мазута к содержанию воды, %	X_1	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.1
Содержание дизельного топлива, %	X_2	0	5	15	25	30	10
Выдержка эмульсии, час	X_3	0	1	6	11	12	5
Коэффициент избытка воздуха	X_4	1	1.1	1.25	1.4	1.5	0.15

В качестве зависимой переменной Y рассматривали содержание NO_x в продуктах сгорания. Для исключения систематической ошибки устанавливали случайный порядок постановки опытов во времени.

Для описания многофакторной зависимости выбран ортогональный многокомпозиционный план 2^4 и квадратичная

модель. Математико-статистическую обработку экспериментов производили по принятой методике [5]. Проверку воспроизводимости опытов проводили по критерию Кохрена. Значимость полученных коэффициентов уравнения регрессии определяли критерием Стьюдента. Адекватность полученной математической модели оценивали с помощью F –критерия Фишера. После обработки результатов экспериментов получено уравнение регрессии для вычисления параметра оптимизации с точностью до 0.7% .

$$Y = 1.387 - 3.6 \cdot 10^{-2} X_1 + 4.08 \cdot 10^{-2} X_4 + 8.54 \cdot 10^{-3} X_3^2 - 2.187 \cdot 10^{-2} X_1 \cdot X_2 - 0.0194 X_1 \cdot X_3 - 2.187 \cdot 10^{-2} X_1 \cdot X_4 + 0.0118 X_2 \cdot X_4 \quad (1)$$

Влияние исследуемых факторов показано на диаграмме (рис. 1).

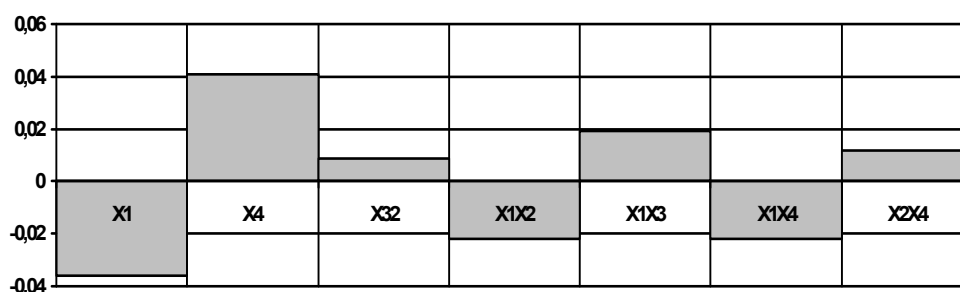
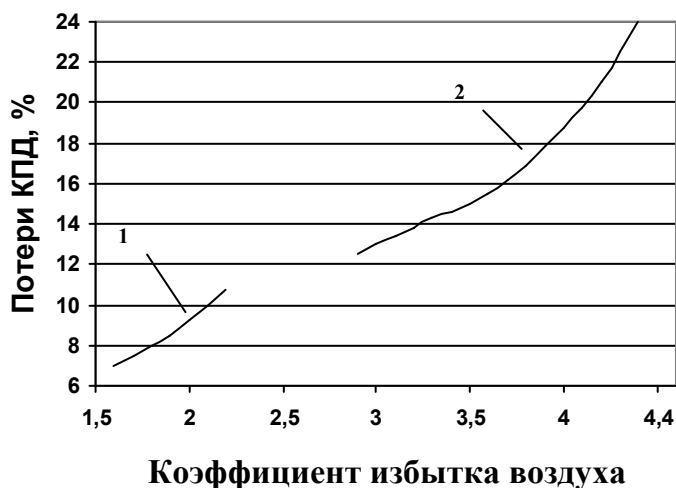


Рисунок 1 - Диаграмма значимости факторов модели

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее влияние на содержание NO_x в продуктах сгорания оказывает отношение содержания мазута к содержанию воды (X_1), причем это влияние проявляется и во взаимодействии с X_2 (содержание дизельного топлива) и X_4 (коэффициент избытка воздуха).

Очевидно, что с увеличением количества воды в соотношении C_m/C_v содержание NO_x в продуктах сгорания уменьшается. Сравнительный анализ процесса горения мазута и водо-мазутной эмульсии показал, что диспергированная влага оказывает как физическое, так и химическое воздействие на топочные процессы. Физическое воздействие заключается в явлении микровзрывов мельчайших капелек воды, находящихся внутри топливной оболочки. При этом происходит дополнительное перемешивание топлива с воздухом. Диссоциация водяных паров, высвободившихся в результате микровзрывов, приводит к увеличению концентрации активных центров реакции. Значительные концентрации гидроксильного радикала увеличивает скорость выгорания окиси углерода. Дополнительно улучшает выгорание водо-мазутной

эмульсии реакция водяного пара- реакция между паром и раскаленным углеродом. Улучшение перемешивания частиц топлива и воздуха за счет «микровзрывов» позволяет снизить избыток воздуха до критического значения и таким образом повысить КПД котла (рисунок 2) [6].



1—работа на водо-мазутной эмульсии; 2—работа на мазуте.

Рисунок 2 - Зависимость потерь КПД от коэффициента избытка воздуха

Сжигание эмульсий приводит к уменьшению количества окислов азота в продуктах сгорания, так как снижается температура пламени. Кроме того, увеличение количества активных центров реакции активизирует горение и соответственно снижает концентрацию атомарного кислорода. В результате этого снижается скорость окисления азота.

Что касается влияния фактора X_4 -коэффициента избытка воздуха, отметим следующее. По степени влияния на Y он доминирует и проявляется прямопропорциональная зависимость. В работе экспериментально установлено, что она имеет экстремальный характер (рисунок 3). Увеличение выхода NO_x до критического значения объясняется повышением концентрации свободного кислорода. При дальнейшем повышении α на выход NO_x оказывает влияние температура горения. При изменении α изменяется также и теоретическая температура горения. При постоянной температуре с увеличением α выход NO увеличивается.

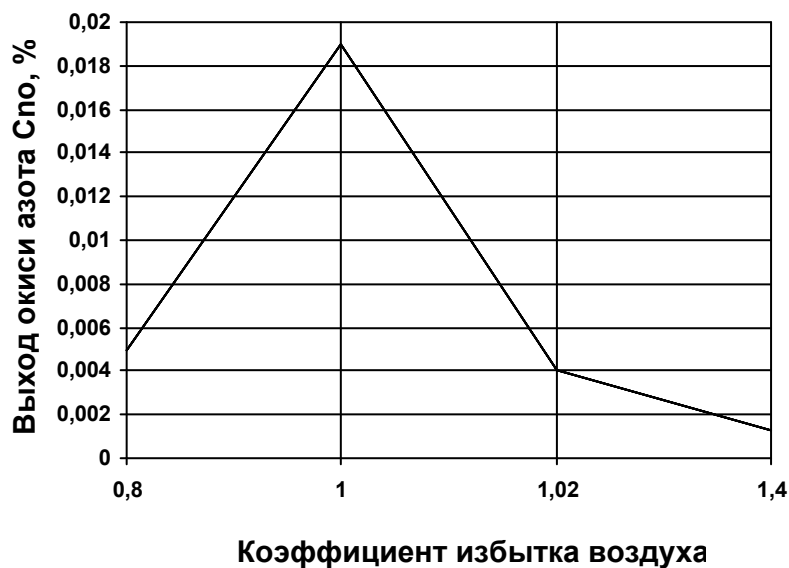


Рисунок 3 - Выход окислов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Зависимость Y от выдержки эмульсии X_3 имеет нелинейный характер, обусловленный скорее всего кинетикой коагуляции частиц дискретной фазы. Но нами установлено, что при значительной устойчивости ВМЭ это влияние практически не значимо.

В эффектах взаимодействий проявляется влияние доминирующего фактора. Исключение составляет $X_1 \cdot X_4$. Видимо увеличение концентрации воды в ЭТС способствует образованию дополнительного атомарного кислорода в реакции горения при диссоциации воды или снижению температуры. В результате чего уменьшается и выход окислов азота. Таким образом, чем большие значения принимает соотношение $X_1 \cdot X_4$, тем меньше Y .

Выводы

1. Сжигание ВМЭ приводит к интенсификации выгорания топлива, уменьшению длины факела и увеличению надежности работы пароперегревателя. Температура уходящих газов при переходе на ВМЭ практически не изменилась. Расчетные оценки показали, что экономические показатели работы котла для традиционного и рекомендуемого вариантов практически одинаковы.

2. Следует особо подчеркнуть, что высокий уровень влажности ВМЭ целесообразно устанавливать только в целях огневого обезвреживания большого количества сточных вод. Если такой необходимости нет, то для значительного снижения газообразных

вредных выбросов вполне достаточно поддерживать соотношение объемов воды и топлива на уровне 3...5% при соответствующей организации процесса сжигания топлива. В этом случае увеличение потери теплоты с уходящими газами (из-за испарения добавляемой влаги) незначительно и вполне компенсируется интенсификацией процесса сжигания топлива и возможностью перехода на более, низкие значения коэффициента избытка воздуха.

3. При соблюдении описанных выше условий увеличения интенсивности низкотемпературной коррозии не наблюдается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.М. Топливные эмульсии. М.: изд-во Академии наук СССР. 1962.
2. Акчурин Р.Ю., Балахничев Н.А. Подготовка мазута к сжиганию в кавитационном реакторе //Энергетик. 1986. №9.С. 8-9.
3. Попов А.И., Голубь Н.В., Ерофеева В., Харитонов А.К., Щупарский А.И. Уменьшение вредных выбросов при сжигании водомазутной эмульсии -Энергетик. 1983. №2. С 11-14.
4. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Третьяков Ю.М. Экономичность работы парового котла при управлении процессом сжигания топлива вводом влаги в зону горения //Теплоэнергетика. 1988. № 8. С. 13-15.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 279с.
6. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д. М. Хзмаляна. Учеб. Пособие для студентов высш. учеб. заведений. М.: Энергия, 1976. – 488 с.

Получено 10.01.2008 г.

УДК 664.2.032.1

И.Е. Соколовская, А.В. Кошлак, В.Е. Черниченко, А.М. Павленко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ

Введение. Пористые материалы находят широкое применение в различных отраслях техники, в частности в качестве теплоизолирующей среды для ряда термонапряженных установок, работающих в разных температурных диапазонах. Поэтому такие материалы должны обладать соответствующими теплофизическими и механическими свойствами. В доступных литературных источниках приводятся зависимости потребительских свойств теплоизоляторов, но определение функциональной зависимости теплофизических характеристик от структурных параметров материала остается актуальной задачей.

В данной работе приведены результаты исследований, которые позволяют определить такую функциональную зависимость в общем виде.

Цель работы. Исследование и моделирование теплофизических свойств пористых материалов при различных режимах его обработки.

Материалы и результаты исследований. Как установлено, теплофизические свойства исследуемых пористых материалов зависят в основном от их плотности и теплопроводности [1,2]. В свою очередь плотность и теплопроводность тоже зависят от многих факторов, в частности от термических режимов вспучивания при парообразовании на стадии изготовления пористого материала. Так, в зависимости от влажности, времени выдержки и температуры нагрева исходного сырья существенно изменяется плотность материала и, соответственно, с изменением плотности меняется и его теплопроводность.

Положительной особенностью этой зависимости является то, что она может быть управляемой, а следовательно прогнозируемой.

Нами был проведен ряд экспериментов по исследованию теплофизических свойств пористых материалов при различных термических режимах их обработки, в которых материал нагревался

при различных температурах, влажности и времени, изменяющихся в заданных диапазонах. Процесс исследовался при стационарных условиях. Материал нагревали в муфельной горизонтальной печи СШОЛ, глубиной 200-250мм, d 100...120мм, с регулируемой на определенный режим термопарой ХА 0-1100. Заготовки размещались на поду печи в тиглях. В качестве исследуемых показателей процесса термической обработки материала были взяты плотность и теплопроводность (табл. 1). На основании экспериментально найденных значений плотности были получены зависимости, показанные на рис. 1-3. Плотность материала определялась по изменению веса заготовок и их геометрического размера.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
1	+1	+1	+1	580	0,126	9	-1,215	0	0	960	0,08
2	-1	+1	+1	1948	0,093	10	+1,215	0	0	648	0,07
3	+1	-1	+1	2050	0,148	11	0	-1,215	0	2136	0,097
4	-1	-1	+1	2050	0,100	12	0	+1,215	0	1820	0,061
5	+1	+1	-1	683	0,145	13	0	0	-1,215	1192	0,082
6	-1	+1	-1	1450	0,148	14	0	0	+1,215	894	0,061
7	+1	-1	-1	1850	0,135	15	0	0	0	1290	0,076
8	-1	-1	-1	2100	0,143	16					

X₁ – температура (T₋₁=100°C; T₀=300°C; T₊₁=500°C);

X₂ – время термического воздействия (t₋₁=1с; t₀=3с; t₊₁=5с);

X₃ – влажность материала (φ_{-1} =0%; φ_0 =30%; φ_{+1} =60%);

Y₁ – плотность материала, кг/м³;

Y₂ – теплопроводность материала, Вт/(мК).

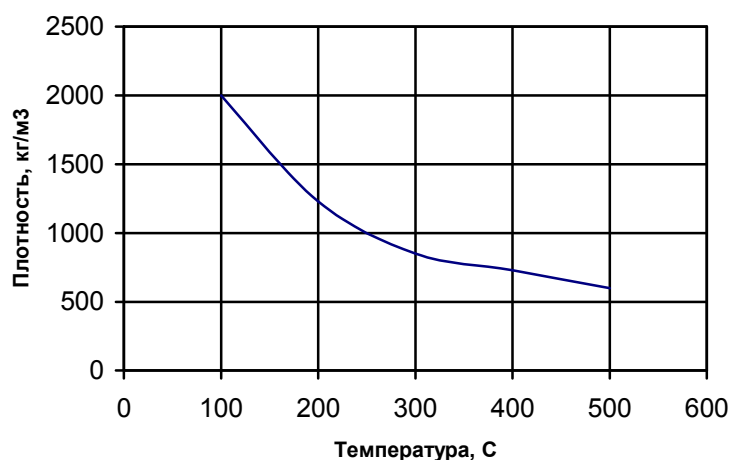
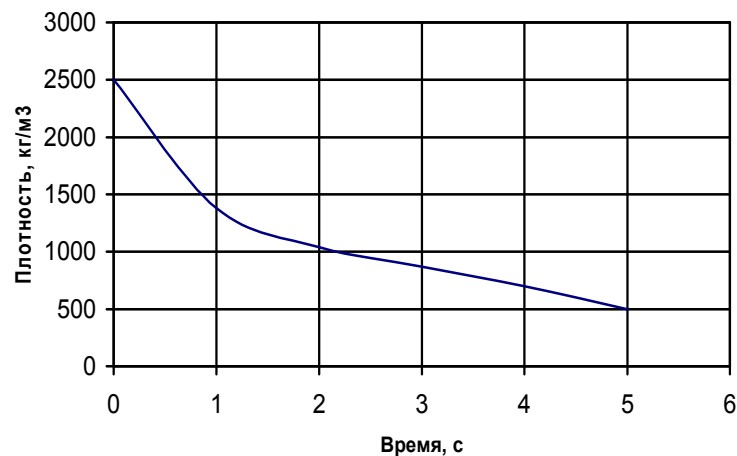
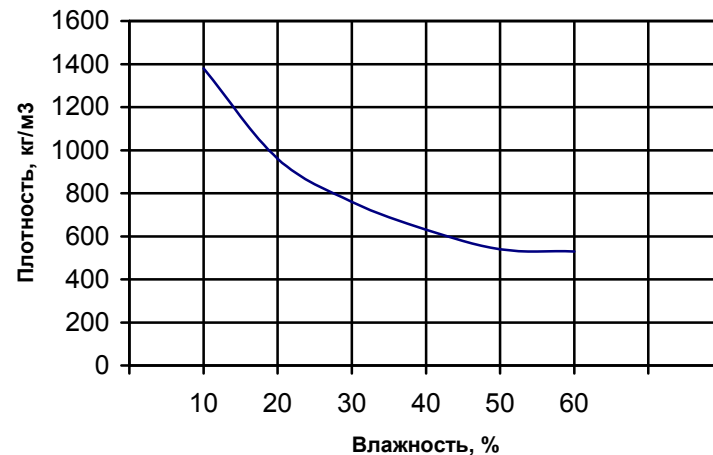


Рисунок 1 - Зависимость плотности от температуры

Рисунок 2 - Изменение плотности во времени при $T=500^{\circ}\text{C}$ Рисунок 3 – Зависимость плотности от начальной влажности при $T_{\text{печи}}=500^{\circ}\text{C}$

Теплопроводность полученных образцов была определена на измерителе теплопроводности ИТ- λ - 400. При исследованиях использовался метод динамического калориметра [3]. В основании метода лежат закономерности монотонного разогрева тонкой пластины в режиме, когда ее температурное поле остается квазистационарным (близким к стационарному).

ИТ- λ - 400 предназначен для измерения λ в диапазоне 0,1 до 5 Вт/м·град. Теловой режим измерения теплопроводности от -100°C до $+500^{\circ}\text{C}$.

На рис. 4 приведена тепловая схема метода. Образец, который испытывается 4, пластина 3 и стержень 5 монотонно разогреваются тепловым потоком $Q(\tau)$, поступающим от основания 1.

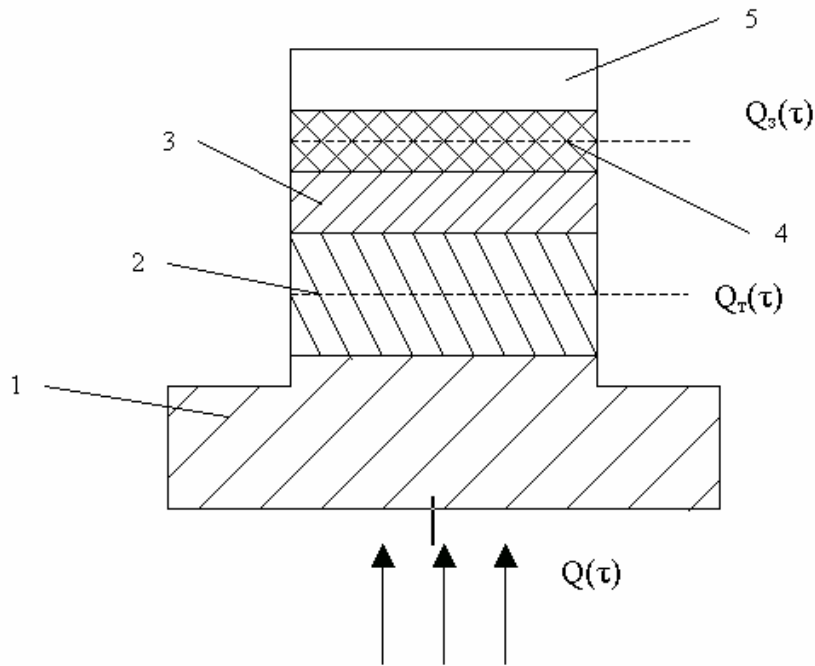


Рисунок 4 – Тепловая схема метода: 1 - основа; 2- пластина; 3–контактная пластина; 4- исследуемый образец; 5- стержень

В ходе экспериментов исследовалось влияние температуры в печи X_1 , времени термического воздействия X_2 , влажности материала X_3 на плотность Y_1 и теплопроводность Y_2 материала. Для моделирования процесса термической обработки использовались методы планирования эксперимента. Для построения квадратичной модели зависимости показателя « Y » от исследуемых факторов X_k , $k=1;2;3$, использовался ортогональный центральный композиционный план второго порядка с ядром 2^3 [4]. В таблице 2 приведены уровни факторов в эксперименте и их фактические значения.

Таблица 2

Условия проведения эксперимента

№ п/п	Фактор	Код	Уровни факторов					
			-1,215	-1	0	1	1,215	Δ
1	Температура, $^{\circ}\text{C}$	X_1	57	100	300	500	543	200
2	Время воздействия, с	X_2	0,57	1	3	5	5,43	2
3	Влажность материала, %	X_3	5,7	10	30	50	54,3	20

После обработки результатов экспериментов получена следующая модель зависимости:

$$Y_1 = 1101,3 - 252X_1 - 344X_2 + 16,7X_3 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 1,6X_3^2 - 235,6X_1X_2 - 43,9X_1X_3 + 30,6X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,046 + 0,005X_1 - 0,004X_2 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 - 0,001X_1X_2 + 0,012X_1X_3 - 0,005X_2X_3 \quad (2)$$

где X_k , $k=1;2;3$ – кодированные значения факторов.

Для проверки значимости отличия от нуля полученных коэффициентов моделей по результатам четырех повторных опытов в нулевой точке ($X_1=X_2=X_3=0$) значения Y_1 : 1346, 1259, 1389, 1166; и Y_2 : 0,076; 0,071; 0,087; 0,071; была найдена дисперсия ошибки опытов S^2 . После вычисления по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (3)$$

получено $S_1 = 98,78$ и $S_2 = 0,0075$.

С учетом полученной дисперсии ошибки опытов S были найдены пороги значимости для различных эффектов факторов $h_k \cdot S$, где $h_k = t_{ТАБЛ} \sqrt{c_k}$ ($k=1;2;3$), $t_{ТАБЛ}$ – табличное значение статистики Стьюдента, найденное для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $\varphi = 3$, $t_{ТАБЛ}(0,05;3) = 3,18$ [4,5], c_k – элементы дисперсной матрицы для соответствующих эффектов факторов.

В результате получим значения для плотности и теплопроводности соответственно: для линейных эффектов $h_1 = 0,961$ и $h_2 = 0,007$; для квадратичных эффектов $h_3 = 1,525$ и $h_4 = 0,011$; для парных эффектов взаимодействия факторов $h_5 = 1,125$ и $h_6 = 0,008$, к-ый эффект факторов считается значимо отличающимся от нуля, если соответствующий ему модуль коэффициента, стоящего при нем в модели, больше порога значимости для данного эффекта, для линейных эффектов больше 94,98, для квадратичных эффектов больше 150,7, для эффектов взаимодействия факторов больше 111,1.

В результате для значимо влияющих факторов и их эффектов взаимодействия была получены следующие модели, для их кодированных значений:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= 1100,1 - 252X_1 - 344X_2 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 235,6X_1X_2, \\ \mathcal{E}_2 &= 0,046 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 + 0,012X_1X_3. \end{aligned} \quad (4)$$

В ходе исследований установлены следующие закономерности. Наиболее сильное влияние на плотность оказывает время термообработки материала в печи. Причем, чем оно больше, тем меньше плотность. Это объясняется тем, что в заданном температурном диапазоне на протяжении исследуемого периода

времени в материале происходили процессы обезвоживания и упрочнения каркаса. Если бы мы существенно (за диапазоном измерения) повысили влажность сырьевой заготовки, то в этом случае материал был бы менее плотным и этот фактор стал бы доминирующим. Но при этом прочность готового материала не соответствовала бы потребительским качествам.

Плотность обратнопропорциональна температуре. Эти зависимости отражены в уравнении (4) соответствующими коэффициентами и знаками при них.

На теплопроводность оказывает влияние кроме названных факторов и влажность сырьевой заготовки. Причем, чем выше влажность, тем меньшее значение приобретает теплопроводность, что также количественно отражает уравнение (4) для ϵ_2 .

Для проверки адекватности полученных моделей (1) по формуле:

$$S_{OCT}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \epsilon_i)^2, \quad (5)$$

была найдена остаточная дисперсия S_{OCT}^2 , где Y_i - фактические, ϵ_i - расчетные значения показателя Y в i -ом опыте, $i = 1, \dots, 15$, n - число опытов, m - число коэффициентов в модели, $m = 6$. В результате расчетов по формуле (2) $S_{OCT1}^2 = 55660,7$ и $S_{OCT2}^2 = 0,00033$.

Проверка адекватности полученной модели истинной зависимости проводилась по критерию Фишера. Расчетное значение статистики Фишера:

$$F_p = \frac{S_{OCT}^2}{S^2}; \quad (6)$$

$F_{p1} = 5,704$ и $F_{p2} = 5,8$, что меньше табличного значения $F_{ТАБЛ} = (0,05; 9; 3) = 8,812$. Так как $F_p < F_{ТАБЛ}$, то полученные модели адекватны истинной зависимости и с достоверностью 0,95 она может использоваться для анализа и прогноза зависимости плотности и теплопроводности от температуры, времени воздействия, влажности материала в области близкой к области проведения эксперимента.

Исходя из вышеприведенных данных плотности и теплопроводности, можно определить зависимость этих двух параметров друг от друга (рис. 5).

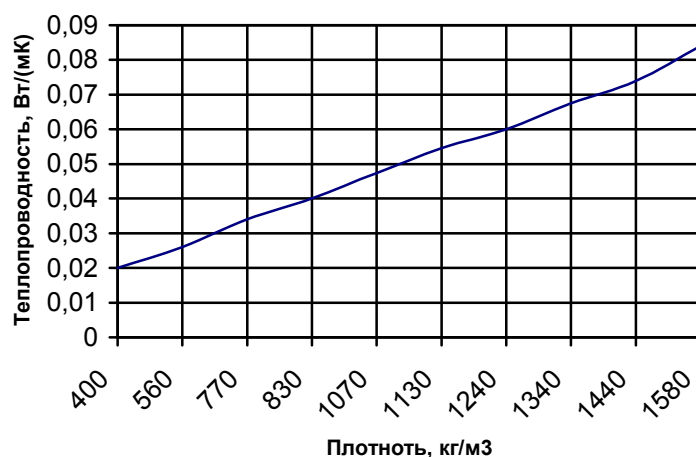


Рисунок 5 – Зависимость теплопроводности от плотности материала при $T=100\ldots 500^{\circ}\text{C}$

Выводы. Исходя из полученной зависимости можно сделать вывод о том, что с увеличением плотности растет и значение теплопроводности материала. Следовательно, для получения материала с наилучшими теплофизическими свойствами (малой теплопроводностью) необходимо достигать меньшей плотности, но при этом и с необходимой прочностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чураев Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. – М.: Химия, 1990. - 272с.
2. Горлов В.Н., Мерлин А.И. Технология производства теплоизоляционных материалов. –М.: Химия, 1987. – 236.
3. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л.: Энергия, 1973 – 143с.
4. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 552с.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. – 279с.

Получено 13.04.2007 г.

УДК 681.5:536.587

О.І. Денисенко

ОПЕРАТИВНА ДІАГНОСТИКА СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ

Вступ

Програмно-апаратні комплекси для дослідження технологій синтезу металокомпозиту [1] і наноструктурних композиційних матеріалів [2] в частині керування енерговиділенням електротермічних пристроїв відносяться до техніки керування і регулювання температури з використанням електричних засобів, зокрема до способів програмного керування температурою об'єкта по заданій програмі. Інтенсивності енерговиділення в таких програмно керуємих електротермічних пристроях, як нагрівачі підкладок для вакуумної конденсації матеріалів, вакуумні випарники матеріалів, анемометричні вимірювачі, нагрівачі транспортуючого газу і приповерхневих шарів металевої стрічки перед інжекцією в її поверхню мікрочастинок, тощо, є технологічними факторами, що визначають як саму можливість, так і продуктивність процесу синтезу композиційних матеріалів.

Аналіз публікацій

Для керування виділенням теплової енергії електротермічними пристроями зі зворотнім зв'язком по температурі, що відслідковується, використовуються регулювання параметрів імпульсів силової напруги (амплітуда, тривалість, форма) і їхніх послідовностей (модуляція скважності), в колі змінного струму – регулювання кута вмикання напруги, в колі сталого струму – регулювання напруги [3]. В певній групі автоматичних регуляторів температури роль термочутливого елемента електротермічного пристрою виконує безпосередньо сам нагрівальний елемент, електричний опір якого вимірюють між циклами подачі на нього потужності [4]. До недоліків електронних регуляторів відносяться крім необхідності вимикання подачі потужності до нагрівального елемента на час виміру його електричного опору (для деяких) ще й низька гнучкість відносно оперативних формування змінного в часі

режиму керування і реєстрації звітної інформації, що відстежувала б енерговиділення.

Для відстежування енерговиділення доцільно визначення сукупності максимально швидко і порівняно просто вимірюваних з використанням сучасних периферійних комп'ютерних пристроїв параметрів, які б характеризували миттєвий стан пристрою, що діагностується. В основу розроблюваного напрямку програмного визначення стану електротермічних пристроїв програмно-апаратного комплексу в процесі їх функціонування укладений принцип сполучення у часі трьох операцій – керування нагріванням, визначення величин термозалежного опору нагрівача і розсіюваної ним теплової потужності.

Постановка задачі

Необхідність забезпечення оперативності комп'ютерних діагностики стану і керування енерговиділенням електротермічних пристроїв розроблюваних програмно-апаратних дослідницьких комплексів для дослідження і порівняння продуктивностей синтезу металокомпозиту в різних енергетичних умовах приводить до постановки задачі про визначення сукупності параметрів, які б вичерпно характеризували миттєвий стан електротермічного пристрою в довільний момент часу, а також сукупності комфортно комп'ютерно вимірюваних інформативних факторів для плинного розрахунку на їх основі визначених параметрів.

Основна частина

Керування станом електротермічних пристроїв змінами електрорушійної сили джерела живлення

Розроблювані програмно-апаратні комплекси [1,2] в частині керування енерговиділенням електротермічних пристроїв включають цифро-аналогові (ЦАП) і погоджувальні перетворювачі. Вимірювані електричні сигнали вводяться в комп'ютер через погоджувальні і аналого-цифрові (АЦП) перетворювачі і використовуються для оперативної комп'ютерної корекції енерговиділення згідно з запрограмованим термічним режимом, а також для фіксації залежностей від часу як цих величин, так і технологічних характеристик нагрівача, ними зумовлених.

Виходячи з відтворення в електричному ланцюзі електротермічного пристрою з високою точністю величини електрорушійної сили (ЕРС), яка встановлюється і регулюється сигналом сучасного ЦАП, що керується програмно через комп'ютер, використовуємо її як визначальну для всіх технологічних характеристик цього пристрою у вже сталих (урівноважених) його станах. Вважатимемо, що зміна величини ЕРС приводить після протікання перехідних процесів до нового рівноважного стану термічного пристрою з новим комплексом значень його характеристик, а також відтворенню цього комплексу характеристик при поверненнях до відповідного значення ЕРС. Припустимо також сталість електричного опору при змінах значень ЕРС тієї частини кола живлення електротермічного пристрою, що істотно не нагрівається.

У випадку забезпечення сталої ЕРС, що діє в замкненому колі послідовно з'єднаних R_T (електричний опір електротермічного пристрою) і r (внутрішній опір джерела живлення), повна виділювана на них потужність P (Рис. 1, лінія 2) обернено пропорційна сумі цих опорів, а коефіцієнт корисної дії η (ККД), що характеризує частку перетворення повної потужності P в теплову потужність P_T , виділювану на опорі R_T електротермічного пристрою, нелінійно (Рис. 1, лінія 1) залежить від відношення опорів R_T/r . Це приводить до формування максимуму (що відповідає умові $R_T = r$) у залежності величини потужності P_T (Рис. 1, лінія 3) від відношення R_T/r .

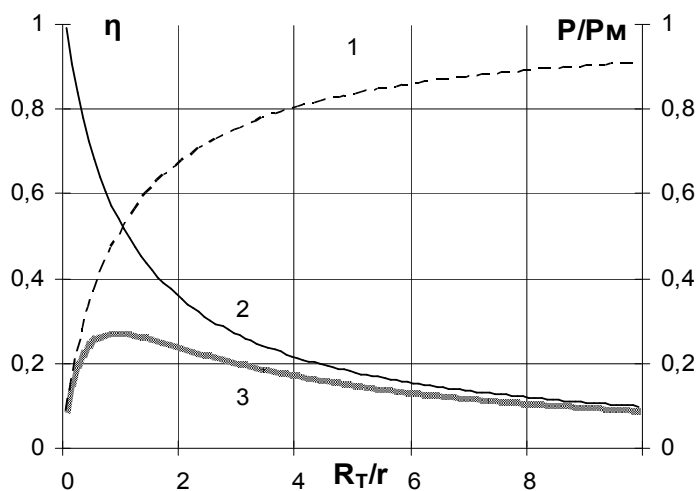


Рисунок 1 - Коефіцієнт корисної дії (1) і характер зміни повної (2) і корисної (3) потужностей (у відносних координатах, розраховані для

певних значень ЕРС і r) в колі електронагрівача в залежності від параметру R_T/r

На Рис. 2 наведені розрахункові залежності гріючих (лінії 7-15) і розсіюваних однаковими по формі стрічковими електронагрівачами різного електричного опору (лінії 1-6) потужностей P (нормованих на максимальну), від відношення $\frac{R_T}{r}$. Лінії 1-6 відповідають наступній

добірці значень відношення $\frac{R_0}{r}$: 1 – 0,034, 2 – 0,075, 3 – 0,15, 4 – 0,3, 5 – 0,5, 6 – 0,75, де R_0 – величина опору електронагрівника при початковій температурі (до першого вмикання струму). Цифрами

7-15 помічені залежності від відношення $\frac{R_T}{r}$ величин гріючих потужностей P (нормованих на максимальну), що відповідають зменшенню електрорушійної сили E джерела живлення з кроком 1 В, починаючи з максимальної $E = 11$ В (лінія 7). електронагрівник

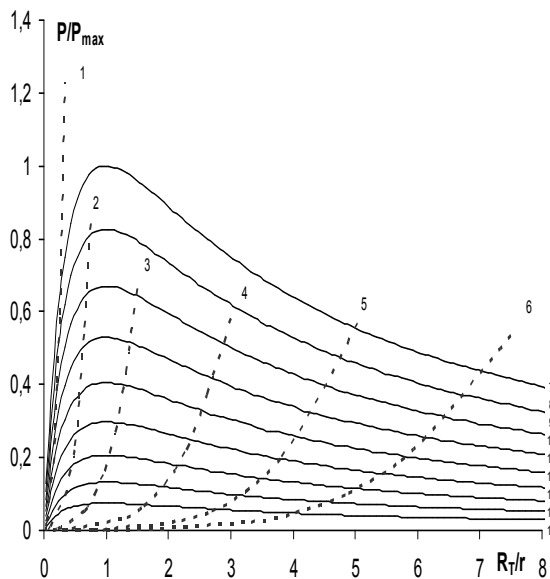


Рисунок 2 - Залежності гріючих (лінії 7-15) і розсіюваних однаковими по формі стрічковими електронагрівачами різного електричного опору (лінії 1-6) потужностей P (нормованих на максимальну), від відношення $\frac{R_T}{r}$;

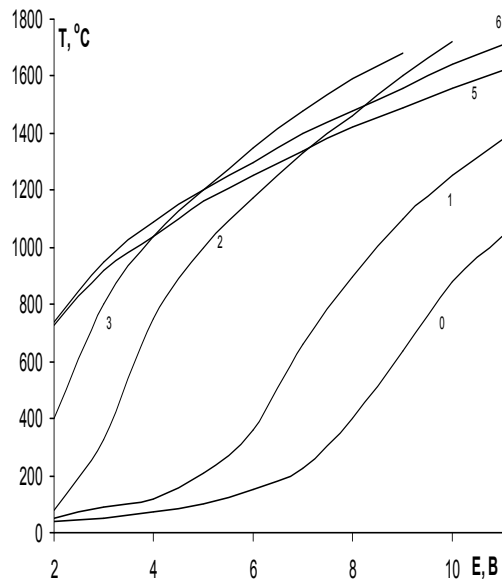


Рисунок 3 - Усталена температура електронагрівника в залежності від величини ЕРС для ряду значень параметру $\frac{R_0}{r}$ (0 – 0,025, 1 – 0,034, 2 – 0,075, 3 – 0,15, 5 – 0,5, 6 – 0,75).

Графіки, наведені на Рис.2, ілюструють розрахункові залежності теплової потужності, що відводиться переважно випромінюванням в стабілізованих станах стрічковими електронагрівачами з одного матеріалу, які мають майже всі геометричні розміри однаковими і різняться тільки за товщинами. У зазначених умовах варіації товщин нагрівачів визначають варіації початкових (до початку нагрівання) величин їхніх опорів R_0 і відповідних стартових величин параметра $\frac{R_0}{r}$.

Миттєвий стан електронагрівника в довільний момент часу вичерпно характеризується точкою на полі графіка Рис. 2 у координатах відносної теплової потужності і відношення його опору R_T до внутрішнього опору r джерела живлення.

З огляду на те, що у вакуумі тепла потужність розсіюється з електронагрівника переважно випромінюванням з поверхні (визначається законом Стефана-Больцмана з урахуванням селективності поглинальної здатності матеріалу) і тепловідводом через контакти (визначається законом теплопровідності Фур'є), залежність теплової потужності, що розсіюється тим самим нагрівачем у незмінному навколишньому оточенні в стабілізованих станах є однозначною функцією температури. Вид цієї функції в загальному випадку залежить як від конструктивних особливостей активного елементу електронагрівника (товщина, площа поверхні, форма) так і від його оточення в реакційній камері (наявність, конфігурація і теплофізичні властивості теплоізоляції, розташування, температури і конфігурації інших термічних елементів, тощо).

З наведених на Рис. 2 і Рис. 3 залежностей випливає, що саме відношення вихідної величини термозалежного опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення є ключовим параметром, який визначає (для кожної пари джерело струму – конструкція електротермічного пристрою) як діапазон можливих величин енерговиділення, так і, як наслідок, діапазон досяжних температур. Узгодженням величин початкового опору (R_0) електронагрівника і внутрішнього опору (r) джерела живлення можливе керування діапазоном енерговиділення і його оптимізація.

Практичне користування параметром $\frac{R_T}{r}$ ускладнюється необхідністю визначення незалежними попередніми вимірами чисельних значень початкового опору електронагрівника і внутрішнього опору джерела живлення для розрахунку відношення $\frac{R_0}{r}$, а також відслідковування в процесі експлуатації електротермічного пристрою чисельних значень плинної температури електронагрівника, яка (з урахуванням температурної залежності опору матеріалу його активного елемента) необхідна для визначення відношення плинних значень опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення.

У зв'язку із вищенаведеним була поставлена задача спрощення визначення миттєвих значень відношення опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення через усунення необхідності використання в розрахунках результатів незалежних попередніх вимірів іншими приладами чисельних значень початкового опору R_0 електронагрівника, внутрішнього опору r джерела живлення і плинних чисельних значень температури електронагрівника.

Інформативні фактори для визначення стану електротермічного пристрою

Розглянемо, які параметри електричного кола з електротермічним пристроєм доцільно і перспективно використовувати в якості первинних інформативних факторів для подальшого вимірювання, введення в комп'ютер через погоджувальні і аналого-цифрові перетворювачі, реєстрації і програмного визначення з них термічного стану цього пристрою.

Відомо [5], що метод регресійного аналізу може бути ефективно використаний для моделювання критеріальних характеристик будь-яких багатофакторних технічних систем, якщо зміна значень факторів, що визначають стан системи, відбувається одночасно. Вдається перспективним розповсюдження цього методу індивідуально на кожний з енерговиділяючих пристроїв програмно-апаратного комплексу.

Відповідно до методу регресійного аналізу стан технічної системи характеризується числовим значенням параметра оптимізації Y , що

залежить від факторів X_i , $i = 1, 2 \dots n$, де n – номер фактора. Безліч можливих станів факторів і їхніх значень визначає безліч станів технічної системи [5].

У наближенні активного характеру електричного опору резистивного нагрівача енерговиділення в ньому визначається взаємозалежними миттєвими величинами струму і прикладені напруги. У зв'язку з цим інформативними факторами, що визначають інтенсивність енерговиділення в резистивному нагрівачеві, можуть бути обрані величини прикладеної до нього електричної напруги U_T а також електричної напруги U_n послідовного з'єднання термостабілізованого резистора і нагрівача, що вводяться в керуючий нагрівачем комп'ютер через погоджувальні і аналого-цифрові перетворювачі.

У розглянутому випадку параметр Y_T – шуканий критерій технологічної ефективності енерговиділення в резистивному нагрівачеві, обумовлений у межах області існування функції $Y_T(U_T, U_n)$ співвідношенням:

$$Y_T(U_T, U_n) = b_0 + b_1 U_T + b_2 U_n + b_{12} U_T U_n. \quad (1)$$

Коефіцієнти регресії b_0, b_1, b_2 і b_{12} можливо визначити із системи рівнянь, виходячи з критерію мінімізації суми квадратів різниць між експериментально встановленими значеннями параметра Y_T і модельним значенням $Y_T \text{ mod}$ у всіх експериментальних точках $j = 1, 2, 3 \dots N$, де N – кількість дослідів [5].

Функція $Y_T(t)$ може бути використана в якості сигналу зворотнього зв'язку для корекції в реальному масштабі часу комп'ютерного керування нагрівачем з метою забезпечення попередньо заданого змінного в часі режиму енерговиділення електротермічного пристрою. Підбором опорних температурних точок при проведенні експериментального градування критерію Y_T технологічної ефективності енерговиділення в резистивному нагрівачеві можливо і доцільно надати зміст термодинамічної температури [6]. В цьому випадку функція $Y_T(t)$ наповниться змістом залежності миттєвої температури нагрівача електротермічного пристрою від часу і може бути використана в

якості сигналу зворотнього зв'язку для корекції в реальному масштабі часу керуючого комп'ютерного сигналу з метою забезпечення попередньо заданого змінного в часі теплового режиму нагрівача.

Стан електротермічного пристрою і його оперативне програмне визначення

Для оперативного визначення стану електротермічного пристрою, який може бути, як зазначено вище, вичерпно охарактеризований сукупністю відносної потужності і відношення опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення (Рис. 2), було розроблено спосіб його програмного визначення [7], який включає комп'ютерне керування електрорушійною силою джерела живлення і базується на одночасних вимірах напруг U_T на електронагрівникові і U_n на послідовному його з'єднанні з термостабілізованим електричним опором. Програмне визначення стану електронагрівника може бути здійснено згідно з розробленим способом у такій послідовності. Після вмикання джерела живлення і стабілізації температури електронагрівника в режимі з коефіцієнтом корисної дії, що не перевищує 0,5, перемиканням збільшують електрорушійну силу, реєструють виміряні значення U_{T_0} і U_{n_0} відразу після перемикавання, вибирають значення U_{T_1} і U_{n_1} в режимі з коефіцієнтом корисної дії, що не нижче за 0,5, які задовольняють умові

$$\frac{U_{T_0} (U_{n_0} - U_{T_0})}{U_{T_1} (U_{n_1} - U_{T_1})} = 1 \quad (2)$$

розраховують параметр

$$\alpha = \sqrt{\frac{(U_{n_1} - U_{T_1}) \cdot (U_{n_0} - U_{T_0})}{U_{T_0} \cdot U_{T_1}}} \quad (3)$$

і визначають стан електронагрівника для будь якого і-го моменту часу сукупністю відносного опору $\frac{R_i}{r}$ і відносної теплової потужності $\frac{P_i}{P_{T_1}}$, які програмно розраховуються по формулах

$$\frac{R_i}{r} = \frac{\alpha \cdot U_{Ti}}{U_{ni} - U_{Ti}} \quad \text{і} \quad \frac{P_i}{P_{Ti}} = \frac{U_{Ti} (U_{ni} - U_{Ti})}{U_{Ti} (U_{ni} - U_{Ti})} \quad (4)$$

де R_i – невідомий опір електронагрівника, що відповідає миттєвим значенням вимірюваних напруг U_{Ti} і U_{ni} , а r – невідомий внутрішній опір джерела живлення.

З використанням співвідношень (4) по точках стаціонарного теплорозсіювання з електронагрівника, зафіксованих при різних значеннях електрорушійної сили джерела живлення, встановлюється залежність розсіюваної досліджуванним нагрівачем теплової потужності від параметру $\frac{R}{r}$ і формулюються висновки щодо можливості і шляхів її оптимізації.

Трансформації діапазону опору електротермічного пристрою при багатократних використаннях і їх програмне визначення

Але відсутність моніторингу впливу на властивості активного елемента електронагрівника зміни кількості матеріалу, що гріє, або зміни його теплофізичних характеристик в процесі експлуатації при багатократних використаннях може перешкоджати досягненню зазначеного вище результату. Такі зміни властивостей активного елемента електронагрівника в процесі експлуатації проявляються під впливом, наприклад, рекристалізації в результаті дії температури, і можуть мати наслідком значну похибку визначення температури на основі температурної залежності опору матеріалу активного елемента.

З метою розв’язання цієї проблеми було розроблено спосіб програмного контролю трансформації діапазону опору вакуумного випарника при багатократних використаннях [8], що також базується на комп’ютерному керуванні ЕРС джерела живлення із сталим внутрішнім опором і на реєстрації в послідовні моменти часу одночасно вимірюваних напруг U_T і U_n .

Пропонований спосіб програмного контролю трансформації діапазону опору вакуумного випарника при багатократних використаннях може бути здійснено у такій послідовності. При кожному використанні випарника з початковою температурою T_0 його активного елемента вмикають джерело живлення і одночасно вимірюють напруги U_{T_0} і U_{n_0} в момент вмикання, а також напруги

U_{Ti} і U_{ni} в наступні послідовні моменти часу, визначають плинні температури за формулою

$$T_i = T_0 \frac{U_{Ti} (U_{n_0} - U_{T_0})}{U_{T_0} (U_{ni} - U_{Ti})} \quad (5)$$

фіксують температуру переходу через максимум добутку $U_{Ti} (U_{ni} - U_{Ti})$ і визначають відносну зміну опору активного елемента для кожної температури при послідовних його використаннях відношенням відповідних їм зафіксованих температур.

Відслідковування відносної зміни опору активного елемента електронагрівника при багатократних використаннях ґрунтується на порівнянні температур, виміряних в моменти збігу чисельних величин опору активного елемента електронагрівника із сталою величиною внутрішнього опору джерела живлення. При проявах суттєвої нелінійності в залежності опору активного елемента від температури з урахуванням цієї нелінійності аналогічно можуть бути визначені зміни при різних використаннях величини опору активного елемента для початкової температури, а через них встановлені трансформації кожної точки діапазону опору електронагрівника при багатократних використаннях.

Оперативне програмне визначення опору потужного електротермічного пристрою в умовах енергозбереження

Нарощування потужності електротермічного пристрою призводить до розвитку певних негативних тенденцій, які суттєво впливають на ефективність використання наведеного вище способу оперативного програмного визначення стану електротермічного пристрою. До них відноситься низька ефективність використання електричної енергії, зумовлена необхідністю постійного розподілу потужності в процесі вимірів між з'єднаними послідовно в електричному колі термостабілізованим резистором і активним елементом електронагрівника, що обмежує коефіцієнт корисної дії і призводить до необхідності використання для забезпечення вимірів щонайменше в два рази більш потужного джерела живлення ніж достатньо для розігріву усамітненого нагрівача до такого ж термічного стану.

Підвищення ефективності використання електричної енергії джерела живлення електронагрівника було досягнуто за рахунок розведення в часі знаходження в електричному колі усамітнених термостабілізованих резисторів і активного елементу нагрівача зі збереженням оперативності аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворювань величин сигналів, що характеризують стан електронагрівника, і їх використання для комп'ютерної корекції енерговиділення згідно з запрограмованим термічним режимом, а також для фіксації залежностей від часу як цих величин, так і технологічних характеристик нагрівача, ними зумовлених [9].

Величина опору R активного елементу електротермічного пристрою (або одного з еталонних термостабілізованих опорів) у довільний момент часу може бути вичерпно охарактеризована точкою на поверхні $R = F(S_{\text{ЦАП}}, S_{\text{АЦП}})$, приклад графіка якої (для одного з досліджених електротермічних пристроїв) у координатах $S_{\text{АЦП}}$ і $S_{\text{ЦАП}}$ величин сигналів аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворювачів наведено на Рис. 4б.

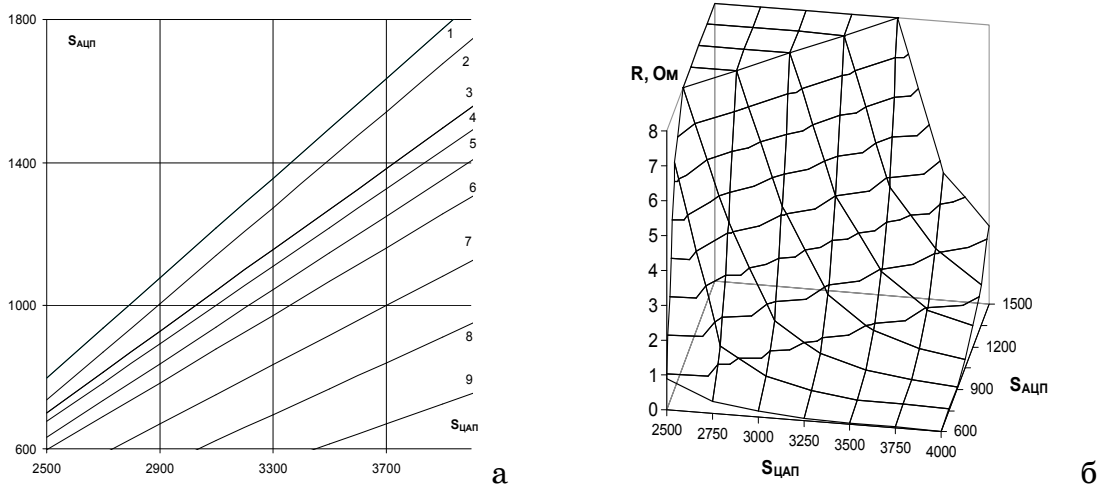


Рисунок 4 - Залежності $S_{\text{АЦП}} = f(R, S_{\text{ЦАП}})$ для добірки значень калібруючих величин термостабілізованих опорів і побудована на їх основі функція $R = F(S_{\text{ЦАП}}, S_{\text{АЦП}})$

По сукупності отриманих для еталонних термостабілізованих опорів залежностей $S_{\text{АЦП}} = f(R, S_{\text{ЦАП}})$ функціональним перетворенням визначалася функція $R = F(S_{\text{ЦАП}}, S_{\text{АЦП}})$, яка

використовувалася для подальшого оперативного визначення поточної величини $R(t)$ по відповідним реєструємим в моменти t чисельним значенням $S_{\text{ЦАП}}(t)$ і $S_{\text{АЦП}}(t)$.

На Рис. 4а наведені залежності (лінії 1-9) сигналів $S_{\text{АЦП}}$ з аналого-цифрового перетворювача електричної напруги на опорі для ряду величин термостабілізованих опорів, що покривають одновимірною сіткою діапазон термічної зміни опору електронагрівника, від сигналу $S_{\text{ЦАП}}$ цифро-аналогового перетворювача, який формує (через погоджувальний перетворювач) електрорушійну силу джерела живлення. Лінії 1-9 на Рис. 4а відповідають добірці значень величин термостабілізованих опорів: 1 – 17 Ом, 2 – 4,25 Ом, 3 – 2,83 Ом, 4 – 2,125 Ом, 5 – 1,41 Ом, 6 – 0,9 Ом, 7 – 0,37 Ом, 8 – 0,1 Ом, 9 – 0,05 Ом.

Миттєвий стан опору електронагрівника або встановленого замість нього термостабілізованого опору в довільний момент часу вичерпно характеризується точкою на полі графіка Рис. 4б у координатах величин сигналів $S_{\text{АЦП}}$ і $S_{\text{ЦАП}}$, а для усталеного стану – точкою, розташованою на поверхні $R = F(S_{\text{ЦАП}}, S_{\text{АЦП}})$, графічно зображений на Рис. 4б.

Висновки

Відношення величин термозалежного опору нагрівника електротермічного пристрою і внутрішнього опору джерела живлення визнано визначальним щодо формування діапазону досяжних величин енерговиділення і, як наслідок, діапазону досяжних температур. Запропоновано характеризувати стан електронагрівника сукупністю миттєвих значень цього відношення і відносної потужності енерговиділення.

Сукупність миттєвих значень двох параметрів – електричних напруг (U_T і U_n) на термозалежному опорі електронагрівника і на послідовному його з'єднанні з термостабілізованим (еталонним) опором – виділена в якості комфортно комп'ютерно реєструємих інформативних факторів для плинного програмного визначення з них стану електротермічного пристрою.

Встановлено можливість і розроблено способи програмного визначення стану електронагрівника електротермічного пристрою і програмного контролю трансформації діапазону опору електронагрівника при багатократних використаннях виключно на основі комп'ютерного керування ЕРС джерела живлення і реєстрації в послідовні моменти часу одночасно виміряних напруг і .

Для забезпечення в умовах енергозбереження оперативності програмного визначення опору нагрівника потужного електротермічного пристрою на рівні швидкостей аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворювань запропоновано розведення в часі знаходження в електричному колі усамітнених термостабілізованих резисторів і потужного нагрівника.

ЛІТЕРАТУРА

1. Денисенко А.И., Калинушкин Е.П. Система автоматизации установки инжекционного формирования металлокомпозита // Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2007).–Ч.1., Севастополь, 2007, СНУЯЄтаП, – С.136-138.
2. Денисенко О.І., Денисенко С.О. Особливості і діагностичні критерії енерговиділення забезпечуючих пристроїв при синтезі наноструктур // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: Збірник наукових праць. - Кривий Ріг, Видавничий відділ НМетАУ, 2006, - Т.2, С.211-215.
3. Денисенко А.И., Денисенко С.А. К управлению греющей мощностью термических устройств для вакуумного синтеза наноструктур // Зб. праць II Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні наукові дослідження – ‘2006’.-Т. 16.-С. 8-12.
4. Ермачков В.В. Способ регулирования температуры электронагревательных приборов // Пат. РФ 2225993. - кл. G 05 D 23/24 (приоритет от 13.02.2002).
5. Яганов П.О., Шварц Ю.М. Регресійний аналіз для калібрування датчиків температури на основі р-п переходу // Доповіді X Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок (МКФТТП-X), 2005, Україна (http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/Start/conference/42.htm).
6. Яганов П.О., Шварц Ю.М. Градування сенсорів температури на основі р-п переходу // Доповіді X Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок (МКФТТП-X), 2005, Івано-Франківськ, Україна (http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/Start/conference/42.htm).
7. Денисенко О.І., Денисенко С.О., Калинушкін Є.П. Спосіб програмного визначення стану електронагрівача // Заявка на патент України № 200604660 (Приоритет від 15.05.2006).
8. Денисенко О.І., Денисенко С.О., Калинушкін Є.П. Спосіб програмного контролю трансформації діапазону опору вакуумного

випарника // Заявка на патент України № 200604659 (Приоритет від 15.05.2006).

9. Денисенко О.І. Спосіб програмного визначення стану електронагрівача // Заявка на корисну модель України № 200708443 (Приоритет від 23.07.2007).

Получено 21.12.2007 г.

УДК 622.788

Д. А. Ковалёв, Н. Д. Ванюкова, М.Н. Бойко

**РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЖИГОМ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

Введение

В настоящее время во всём мире активно ведутся работы по разработке и использованию математических моделей обжига окатышей [1-3]. Принципиальное отличие разработанной модели от ранее предлагаемых и используемых состоит в том, что здесь расширены и рассмотрены более последовательно процессы теплообмена между слоем окатышей и газом, разложение известняка, окисление магнетита, окисление углерода при моделировании обжига углеродсодержащих окатышей.

Постановка проблемы. При производстве окатышей большое внимание уделяется проблемам снижения расхода энергоресурсов и повышению качества конечного продукта. Совершенствование системы управления является необходимым условием для их решения. При построении системы управления в её основу положено моделирование технологических процессов – для прогнозирования свойств окатышей и оптимизации процесса обжига. Цель данной работы – разработка математической модели обжига окатышей на конвейерной машине.

Изложение основного материала исследований. Модель основана на описании реальных физико-химических и тепловых процессов, протекающих при обжиге окатышей. Испарение влаги, разложение известняка, окисление магнетита и окисление углерода анализируются с позиций кинетики. Для общего случая топохимического реагирования модель массопереноса включает химическое взаимодействие и диффузию газового компонента в пограничной пленке и через пористый слой продукта взаимодействия.

Основные положения и допущения, принятые в модели:

Сырые окатыши образуют горизонтальный слой постоянной высоты $h_{\text{сл}}$, состоящий из окатышей заданного среднего диаметра $d_{\text{ок}}$, расположенных с порозностью ε .

Каждый сухой окатыш состоит из магнетита Fe_3O_4 , массовая доля которого составляет p_1 , известняка CaCO_3 с массовой долей p_2 , углерода с массовой долей p_3 , а также бентонита с массовой долей $1 - p_1 - p_2 - p_3$.

Все окатыши имеют одинаковую пористость ε_1 , которая представляет объемную долю пустот (пор) от всего объема окатыша.

Из-за малого диаметра окатыши принимаются изотермичными, перепад температур по толщине окатыша считается пренебрежимо малым.

Теплопроводность слоя из-за малой площади контакта окатышей не учитывается.

По ширине слоя температурный градиент отсутствует.

В слое суммарная теплота в пустотах, заполненных газом, в любой момент времени пренебрежимо мала по сравнению с теплотой окатышей.

Тепловые потери при обжиге окатышей не учитываются.

Слой окатышей перемещается в горизонтальном направлении с постоянной скоростью, последовательно проходя зоны сушки, подогрева, обжига 1, обжига 2 и охлаждения.

В каждой зоне в слой окатышей сверху вниз поступает поток газа со своей постоянной скоростью, температурой и содержанием кислорода.

Базовые уравнения модели. В модели использованы следующие основные уравнения:

Дифференциальное уравнение удаления влаги в слое окатышей [4]:

$$L_{H_2O} \cdot \rho_{ок} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial W_{H_2O}}{\partial \tau} = -\alpha_V \cdot (t_{г} - t_{исп}), \quad (1)$$

где L_{H_2O} - скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг H_2O ; $W_{H_2O} = W_{H_2O}(x, \tau)$ - функция распределения массовой доли влаги в окатышах по высоте слоя; $t_{исп} = 100^\circ\text{C}$ - температура испарения влаги; $\rho_{ок}$ - плотность сухих окатышей, кг/м³; ε - порозность слоя, доли ед; $t_{г}$ - температура газа по высоте слоя, $^\circ\text{C}$; α_V - объемный коэффициент теплоотдачи, Вт / (м³К).

Принимаем, что при наличии влаги в окатышах, т.е. при $W_{H_2O} > 0$, вся теплота, подводимая к окатышам, идет на испарение H_2O . Конденсацию влаги в нижележащих горизонтах слоя не учитываем. В этот период температура окатышей не превышает 100°C .

После удаления всей влаги, когда $W_{H_2O}=0$, нагрев окатышей можно выразить дифференциальным уравнением теплового баланса для слоя сухих окатышей, где скорость изменения температуры окатышей в слое является функцией теплопереноса от газа и теплоты окисления магнетита, а также потерь теплоты диссоциации известняка и теплоты реакций окисления углерода:

$$\rho_{ок} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot C_{ок} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_V \cdot (t_{\Gamma} - t_{ок}) + Q_1 - Q_2 + Q_3, \quad (2)$$

$C_{ок}$ – теплоемкость окатышей, Дж/(кг·К); $t_{ок}=t_{ок}(x, \tau)$ – функция распределения температуры окатышей по высоте слоя $^\circ\text{C}$; τ – время, с; α_V – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³·К); t_{Γ} – температура газа по высоте слоя, $^\circ\text{C}$; Q_1 – теплота реакции окисления магнетита, выделяющееся в единице объема слоя, Вт/м³; Q_2 – теплота реакции разложения известняка, поглощающаяся в единице объема слоя, Вт/м³; Q_3 – теплота реакции окисления углерода, выделяющаяся в единице объема слоя окатышей, Вт/м³.

Объемный коэффициент теплоотдачи конвекцией от газа окатышам определяется по формуле [5]:

$$\alpha_V = 186 \cdot \frac{W_{\Gamma}^{0,9} \cdot (t_{\Gamma} + 273)^{0,3}}{d_{ок}^{0,75}} \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение теплового баланса для газа:

$$\rho_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma} \cdot \frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x} = \alpha_V \cdot (t_{ок} - t_{\Gamma}), \quad (4)$$

где ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³; C_{Γ} – теплоемкость газа, Дж/(м³·К); $t_{\Gamma}=t_{\Gamma}(x, \tau)$ – функция распределения температуры газа по высоте слоя, $^\circ\text{C}$; x – координата, направленная по высоте слоя сверху вниз, м; W_{Γ} – нормальная скорость движения газа на свободное сечение слоя, м/с.

В разработанной модели рассматриваются следующие физико-химические процессы, протекающие во время обжига окатышей.

1. Диссоциация известняка.
2. Окисления магнетита.
3. Окисления углерода (при добавке в шихту твердого топлива).

Для описания процесса окисления магнетита в окатышах принята модель, в которой реакция окисления протекает от поверхности окатыша к его центру и определяется массообменом на поверхности окатыша и скоростью диффузии кислорода с поверхности окатыша к еще неокисленному ядру, а также скоростью протекания реакции окисления [6].

$$V = \frac{16\pi r_m^2(\tau) \cdot P \cdot (C_{O_2}^{равн} - C_{O_2})}{R_o T_{ок} \cdot \left\{ \frac{1}{k_r} + \frac{r_m^2(\tau)}{r_{ок}^2 \cdot k_{gO_2}} + \frac{r_m(\tau)}{D_{O_2}} \cdot \left[1 - \frac{r_m(\tau)}{r_{ок}} \right] \right\}}, \quad (5)$$

где V – скорость реакции окисления магнетита, моль Fe_3O_4 м/с;

$r_m(\tau)$ – радиус ядра еще неокисленного магнетита, м; $r_{ок} = \frac{d_{ок}}{2}$ –

радиус окатыша, м; P – общее давление газа, Па; $C_{O_2}^{равн}$ – равновесная объемная концентрация O_2 , моль/м³; C_{O_2} – объемная концентрация O_2 у поверхности окатыша, моль/м³; R_o – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $T_{ок} = t_{ок} + 273$ – температура окатыша, К; k_r – скорость химической реакции окисления магнетита, м/с; k_{gO_2} – Равновесная объемная концентрация O_2 определяется упругостью диссоциации гематита и зависит от температуры. Движение границы реакции определяется уравнением:

$$\frac{dr_m(\tau)}{d\tau} = - \frac{V \cdot M_{Fe_3O_4}}{4\pi r_m^2(\tau) \rho_{ок} (1 - \varepsilon_1) p_1}, \quad (6)$$

где ε_1 – пористость окатышей; $M_{Fe_3O_4}$ – молекулярная масса Fe_3O_4 .

Скорость реакции окисления выражается зависимостью:

$$k_r = 300 \cdot e^{\left(\frac{6000}{T_{ок}} \right)}, \text{ м/с.} \quad (7)$$

Для описания массообмена на поверхности окатышей применяется критериальная зависимость вида [4]:

$$Sh = \frac{kr}{D} \cdot d = A_0 + A_1 \cdot Re^m \cdot Sc^n \quad (8)$$

Где A_0 , m , n – константы, зависящие от природы вещества и газа, Re – число Рейнолдса, Sc – число Шмидта.

Для шарообразного образца используется уравнение Ранца-Маршала:

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot \Phi \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (9)$$

где Φ – поправочный коэффициент, принятый для слоя окатышей $\Phi = 1$.

D – коэффициент диффузии кислорода в воздухе, рассчитываемый по эмпирической формуле.

Коэффициент массообмена рассчитывается как:

$$k_{gO_2} = \frac{Sh \cdot D}{d_{ок}}, \text{ м/с} \quad (10)$$

Коэффициент диффузии кислорода в окатыше определяется с учетом пористости окатыша:

$$D_{O_2} = \frac{D \cdot \varepsilon_1}{\chi} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (11)$$

где χ – коэффициент извилистости пор окатыша.

В результате реакции окисления в единице объема слоя окатышей будет выделяться количество теплоты:

$$Q_1 = q_1 \cdot V(\tau) \cdot N_1 \text{ Вт/м}^3, \quad (12)$$

где q_1 – теплота реакции окисления магнетита, Дж/кг Fe_3O_4 ; N_1 – число окатышей в единице объема слоя.

Степень окисления окатышей определяется как:

$$\psi_{Fe_3O_4}(\tau) = 1 - \left[\frac{r_m(\tau)}{r_{ок}} \right]^3 \quad (13)$$

Для описания процесса диссоциации известняка применяется модель, в которой принято, что реакция разложения $CaCO_3$ начинается с поверхности куска известняка и протекает по направлению к его центру таким образом, что в любой момент времени этого процесса имеет место неразложившееся ядро и внешняя область, содержащая CaO (физически процесс диссоциации рассматривается аналогично процессу окисления магнетита). Используется допущение, что процесс диссоциации $CaCO_3$ в окатыше протекает так же, как и в куске чистого известняка, но с учетом его массовой доли p_2 . Таким образом, скорость реакции известняка определяется по уравнению:

$$V_{\text{CaCO}_3} = \frac{4\pi r_{\text{ок}}^2 (C_{\text{CO}_2}^{\text{равн}} - C_{\text{CO}_2})}{\frac{1}{k_{\text{CO}_2}} + \left[\frac{r_{\text{ок}}}{r_1(\tau)} \right]^2 \frac{K_1}{k_1 R_0 T_{\text{ок}}} + \frac{r_{\text{ок}} [r_{\text{ок}} - r_1(\tau)]}{r_1(\tau) D_{\text{CO}_2}}} \quad (14)$$

где V_{CaCO_3} – скорость реакции разложения известняка, моль/с;
 $C_{\text{CO}_2}^{\text{равн}}$ – равновесная объемная концентрация CO_2 , моль/м³; C_{CO_2} –
 объемная концентрация CO_2 на поверхности окатыша, моль/м³; k_{CO_2} –
 коэффициент массопереноса CO_2 на поверхности окатыша, м/с; $r_1(\tau)$ –
 радиус ядра, содержащего неразложившийся известняк в момент
 времени τ , м; K_1 – константа реакции разложения известняка, С⁻¹;
 k_1 – скорость химической реакции разложения известняка, м/с; D_{CO_2} –
 коэффициент диффузии CO_2 в воздухе, м²/с.

В уравнении (14) удобнее перейти от концентраций CO_2 к
 соответствующим давлениям. Тогда скорость реакции известняка
 будет определяться выражением:

$$V_{\text{CaCO}_3} = \frac{4\pi r_{\text{ок}}^2 (P_{\text{CO}_2}^{\text{равн}} - P_{\text{CO}_2})}{R_0 T_{\text{ок}} \left\{ \frac{1}{k_{\text{CO}_2}} + \left[\frac{r_{\text{ок}}}{r_1(\tau)} \right]^2 \frac{K_1}{k_1 R_0 T_{\text{ок}}} + \frac{r_{\text{ок}} [r_{\text{ок}} - r_1(\tau)]}{r_1(\tau) D_{\text{CO}_2}} \right\}} \quad (15)$$

Перемещение границы реакции определяется:

$$\frac{dr_1(\tau)}{d\tau} = - \frac{V_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3}}{4\pi r_1^2(\tau) \rho_{\text{ок}} (1 - \varepsilon_1) p_2}, \quad (16)$$

где M_{CaCO_3} – молекулярная масса CaCO_3 .

В результате разложения известняка поглощается следующее
 количество теплоты:

$$Q_2 = q_2 \cdot V_{\text{CaCO}_3} \cdot N_1, \quad (17)$$

где Q_2 – теплота диссоциации CaCO_3 , Дж/кг CaCO_3 .

Константу реакции разложения известняка определяем как

$$K_1 = 10^5 \cdot \exp \left(\frac{-5211}{T_{\text{ок}}} + 7,35 \right) \quad (18)$$

Скорость химической реакции разложения известняка:

$$k_1 = \frac{91,2}{60} \cdot \exp \left[\frac{-40000}{82,05 \cdot T_{\text{ок}}} \right] \quad (19)$$

Коэффициент диффузии CO_2 (D_{CO_2}) принимаем равным
 коэффициенту диффузии кислорода D_{O_2} , определение которого было
 рассмотрено выше.

Степень диссоциации известняка в окатыше в процессе обжига рассчитывается по формуле:

$$\Psi_{\text{CaCO}_3}(\tau) = 1 - \left[\frac{r_1(\tau)}{r_{\text{ок}}} \right]^3 \quad (20)$$

Для описания окисления углерода, при моделировании процесса обжига углеродсодержащих окатышей принимаем, что углерод окисляется по реакции $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$. Тогда скорость выделения теплоты в единице объема окатышей будет иметь следующее выражение:

$$Q_3 = q_3 \cdot N_1 \cdot \frac{dm_c}{d\tau} \quad (21)$$

В реальных условиях обжига окатышей с добавками твердого топлива, горение углерода твердого топлива происходит в кинетическом режиме и во всем объеме. Тогда уравнение скорости химической реакции для данного процесса будет иметь вид:

$$V_{x.p.} = k_{x.p.} \cdot c_{\text{O}_2} \cdot S_c \quad (22)$$

где

$$k_{x.p.} = k_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (23)$$

Скорость химической реакции определяется по эмпирическому уравнению и зависит от температуры следующим образом:

$$k_c = \frac{1,39}{60} \cdot 10^5 \cdot \exp\left(\frac{-38196}{1,987 \cdot T_{\text{ок}}}\right) \quad (24)$$

k_c – константа скорости реакции, с^{-1} ;

c_{O_2} – концентрация кислорода в частице твердого топлива;

S_c – поверхность частички углерода, м^2 ;

Принимаем, что частицы твердого топлива имеют шарообразную форму, тогда скорость горения частички углерода будет описываться уравнением:

$$V_c = kc \cdot c_{\text{O}_2} \cdot K_1 \cdot m_c^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$

Для оценки завершенности процесса обжига и качества окатышей был использован интегральный температурно-временной показатель [7]:

$$\sum t\tau = \int_0^{\tau_3} [t_{\text{ок}}(\tau) - t_0] d\tau, \quad (26)$$

где t_0 – температура начала твердофазного спекания.

С помощью разработанной математической модели рассчитывали процессы обжига окатышей комбинированным топливом при различном содержании углерода (от 0,1 до 1%) и постоянных высоте слоя окатышей равной 400 мм, начальном содержании влаги в окатышах 10 %, содержании известняка 7 %, содержании бентонита 2% и содержании концентрата 91 %. Полученные результаты распределения температур и степени окисления углерода графически представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Видно, что с увеличением содержания углерода в окатышах нагрев слоя принимает вид тепловой волны. С увеличением содержания углерода максимум температур слоя располагается на более низких горизонтах слоя и заметно, что при содержании углерода более 0,5 % наблюдается зона охлаждения в верхней части слоя (рисунок 1). При увеличении количества углерода в слое его окисление происходит менее равномерно по высоте слоя (рисунок 2), высота зоны интенсивного горения сокращается.

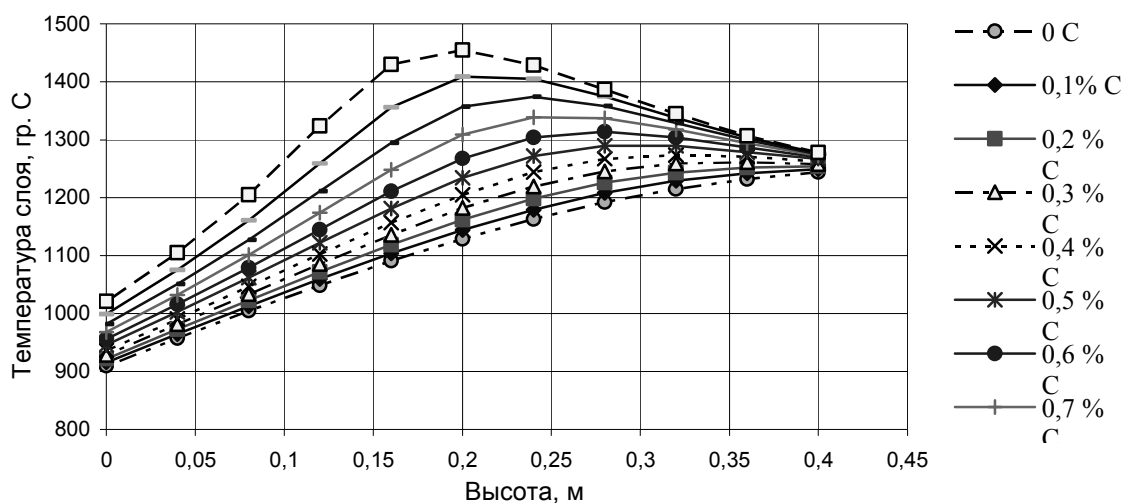


Рисунок 1 - Распределение температур окатышей по высоте слоя в зависимости от содержания углерода (конец зоны обжига)

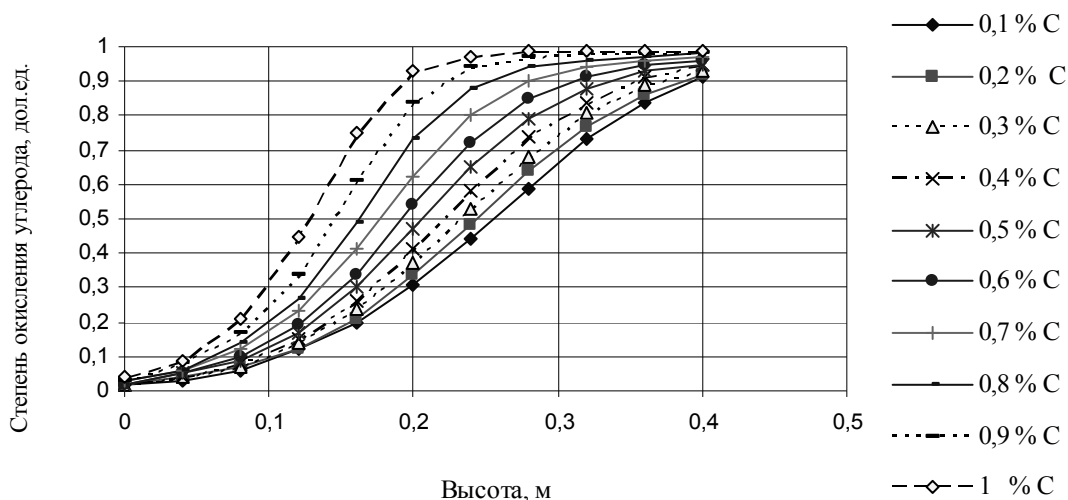


Рисунок 2 - Изменение степени окисления углерода по высоте слоя в зависимости от содержания углерода в окатышах (конец зоны обжига)

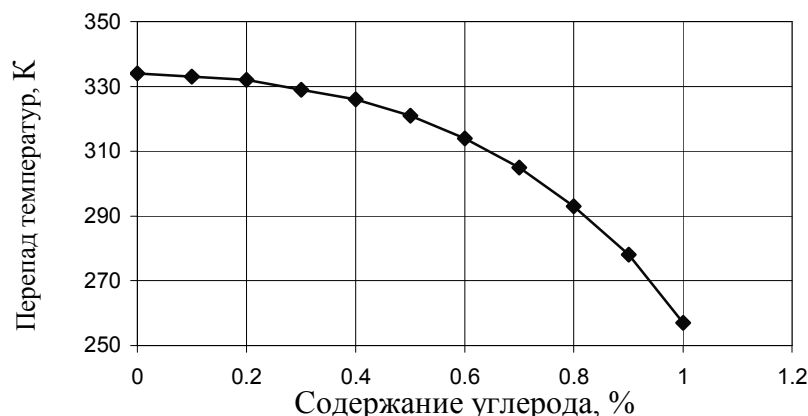


Рисунок 3 - Зависимость перепада температур в слое от содержания углерода в окатышах

На рисунке 3 показано изменение разности температур окатышей верха и низа слоя в зависимости от содержания углерода в зоне обжига. Добавление твёрдого топлива в шихту может значительно сократить перепад температур по высоте слоя, что в свою очередь позволит повысить время пребывания нижней части слоя при температурах, достаточных для процессов упрочнения и как следствие улучшит показатели прочности этих окатышей.

При добавлении более 0,7 % углерода наблюдается значительный перегрев окатышей (рисунок 1). Для предотвращения этого необходимо снижение температур теплоносителя в горне зоны обжига на 100 – 150 °С. Углерод в нижней части слоя не успеет полностью окислиться за время пребывания в зоне обжига, и часть его будет догорать в зоне охлаждения, повышая температуру газа на выходе из

слоя. Это в свою очередь так же позволит снизить расход газообразного топлива при формировании газа – теплоносителя в зоне обжига.

Выводы

Разработана динамическая математическая модель слоевого окислительного обжига углеродсодержащих железорудных окатышей на конвейерной машине. Модель позволяет рассчитать влияние характеристик отдельных окатышей и слоя на показатели процесса обжига и качество обожженных окатышей. К ним относятся содержание известняка, магнетита, твердого топлива, а также скорости фильтрации и температуры теплоносителя, содержание в нем кислорода, скорость движения тележек обжиговой машины, высота слоя и его порозность, размер окатышей, их плотность и др.

С помощью математической модели исследованы закономерности обжига железорудных окатышей с использованием комбинированного топлива на конвейерной машине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.М. Майзель, А.А. Буткарев. Промышленное применение математических моделей для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине. // сб.: "Теплотехника процессов подготовки металлургического сырья". – Екатеринбург. – 2000. – С. 24.
2. Юсфин Ю.С., Каменев А.Д., Буткарев А.П. Управление окускованием железорудных материалов. – М.: Металлургия. – 1990.
3. Thurlby J.A., Batterman R.I., Measurement and prediction of drying rates and spalling behaviour of hematite pellets. // Transactions Institute Mineral. – Section C. – 1980. – v. 89. – P. 125 – 131.
4. Young R.W., Cross M., Gibson R.D. Mathematical model of grate – kiln – cooler process used for induration of iron ore pellets. // Ironmaking and Steelmaking. – 1979. – N 1. – P. 1 – 13.
5. Thurlby I.A., Batterham R.I., Yurner R.E. Development and validation of a mathematical model for the moving grate induration of iron ore pellets. – / International Journal Mineral Processing. – 1979. – N 6. – P. 43 – 64.
6. Теорія металургійних процесів. / В.Б. Окоцький, О.Л. Костюлов, В.К. Сімонов та ін. // Київ. – 1997.
7. Henning M., Lehmkuhler H. J. Thermische Aufbereitung metallhaltiger Huttenrest stoffe mit Hilfe des Inmetco-Direktreductions verfahrens // Informations schrift. – 1988. – N 39. – S. 139 – 156.

Получено 21.12.2007 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ УДАЛЕННЫХ СЕТЕВЫХ АТАК НА УРОВНЕ ПРИЛОЖЕНИЙ

Постановка проблемы. Объединение компьютеров в локальные и глобальные сети открывает огромные возможности для решения задач, связанных с обменом и обработкой информации. Однако, при этом возникает множество проблем, связанных обеспечением безопасности соединения, защитой сети и конкретного хоста от несанкционированного сетевого доступа. В последнее время развиваются методы построения защиты систем, основанные на категоризации новых объектов по степени их безопасности и установке некоторого низшего уровня безопасности (порога доверия), преодоление которого приводит к тому, что объект считается доверенным[1-4]. Применение такой модели представляется оправданным благодаря возможности реализации гибкой политики безопасности, т.к. порог доверия может изменяться во времени. При этом возникает потребность в разработке соответствующих правил работы системы защиты, минимизирующих количество ошибочных ситуаций (доверенный объект признается не доверенным и наоборот).

Результаты исследований. Целью исследований являлась разработка модели системы, альтернативной к антивирусам и брандмауэрам прикладного уровня, позволяющей осуществлять защиту хоста или сети от несанкционированного доступа путем отслеживания e-mail сообщений, содержащих вирусы или потенциально опасный исполняемый код.

Исходно принималось, что сообщение должно соответствовать определенной структуре и должно быть сформированным по определенным правилам. Иначе это сообщение считается подозрительным, а в случае невозможности корректного разбора – опасным. Схема обработки сообщения состоит из следующих этапов: рекурсивная декомпозиция электронного письма; анализ структуры заголовка сообщения; анализ содержимого письма с последующей его категоризацией; действия над письмом в зависимости от присвоения

категории. Приведенная схема конкретизирована в следующий общий алгоритм обработки:

1. получение сообщения;
2. разбивка сообщения на заголовок, тело и вложения;
3. выделение тел отдельных вложений;
4. декодирование файла вложения по методу его кодирования;
5. определение действительного типа вложения;
6. выделение кода из файла вложения;
7. проверка полученного кода на содержание элементов кода вируса;
8. классификация сообщения и последующие действия над ним.

При выборе параметров для анализа почтового сообщения исходили из следующих предпосылок: сообщение однозначно считается опасным при совпадении структуры кода в теле вложения с известными опасными структурами кодов но, поскольку сигнатурный метод может не выявить все существующие вирусы, требуется ввести правила для оценки корректности структуры самого сообщения. По результатам анализа типового поведения вирусов в сообщениях электронной почты были выделены основные параметры сообщения, подлежащие детальной проверке. Чтобы определить порог доверия для почтового сообщения введем некоторую шкалу, на основе которой будет определяться степень его безопасности. Для этого опишем идеальное с точки зрения безопасности почтовое сообщение и примем его за образец. Введем соответствующие обозначения и определим возможные значения выделенных ранее параметров.

Таблица 1

Параметры почтовых сообщений

Название параметра почтового сообщения	Обозначение	Идеальное значение	Возможные значения
Совпадение поля “От” и обратного адреса	Р _{адр}	Да	Да/Нет
Совпадение указанного в заголовке сообщения MIME-типа вложения и его реального типа	Р _{тип}	Да	Да/Нет
Совпадение указанной в теле сообщения контрольной суммы вложения и ее реального значения	Р _{к_{сум}}	Да	Да/Нет
Совпадение первой и второй подписей boundary, которые ограничивают вложения в теле почтового сообщения	Р _{подп}	Да	Да/Нет

Количество фрагментов данных между подписями boundary равно 1	Рфрагм	Да	Да/Нет
Степень вложенности почтовых сообщений ≤ 15	РвлП	Да	Да/Нет
Степень вложенности архивов во вложениях в почтовые сообщения ≤ 33	РвлА	Да	Да/Нет
Отсутствие исполняемого кода в теле вложений	Ркод	Да	Да/Нет

Наиболее весомыми из параметров являются отсутствие исполняемого кода в теле вложений, степень вложенности архивов во вложениях в почтовые сообщения, совпадение указанного в заголовке сообщения MIME-типа вложения и его реального типа. Далее по степени опасности следуют несовпадения полей “От” и обратного адреса а также несовпадение указанной в теле сообщения контрольной суммы вложения и ее реального значения. На последнем месте, с точки зрения безопасности, находятся параметры несовпадения первой и второй подписей boundary, которые ограничивают вложения в теле сообщения, и количество фрагментов данных между этими подписями.

Более подробно остановимся на принятых значениях степеней вложенности

РвлП и РвлА. Среди известных вирусов, использующих вложения почтовых сообщений одно в другое, вирусом, который использует наименьшую среди других степеней вложенности, является Email-Worm.Win32.Swen и его разновидность I-Worm/Swen.A, создающие вложения, которые выглядят как вложение письма в письмо. Количество вложений колеблется от 16 до 666. Поэтому максимальное допустимое число вложений было ограничено 15. Существует также 3ARC-Worm.Win32.Gen – червь, создающий архивы, вложенные один в один, и присоединяющий их к почтовым сообщениям в качестве вложений. Количество таких вложенных архивов может быть в пределах от 34 до 134. Вложения архива в архив происходит для всех известных червю типов архивов, количество которых составляет 34. Поэтому максимальная степень вложения архивов ограничена 33.

Для оценки степени безопасности почтового сообщения использовалась интегральная оценка в виде взвешенной суммы всех параметров:

$$P_{\text{инт}} = \sum P_i V_i, (1)$$

где P_i - значение i -того параметра почтового сообщения, V_i -его весовой коэффициент.

Для определения весовых коэффициентов параметров было проведено шесть серий практических экспериментов на базе разработанного проху-сервера с почтовыми сообщениями с заранее известной степенью безопасности. Учитывались всевозможные комбинации значений выделенных параметров. Исходно принималось, что наиболее значимые параметры должны иметь весовые коэффициенты не менее чем на 75% большие, чем остальные. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ п/п	$P_{тип}$	$P_{влП}$	$P_{влА}$	$P_{код}$	$P_{др}$	$P_{сум}$	$P_{подп}$	$P_{фрагм}$	Точность классификации
	0.15	0.15	0.15	0.15	0.12	0.12	0.08	0.08	не точная
2.	0.16	0.16	0.16	0.16	0.11	0.11	0.07	0.07	не точная
3.	0.17	0.17	0.17	0.17	0.10	0.10	0.06	0.06	точная
4.	0.18	0.18	0.18	0.18	0.10	0.10	0.04	0.04	точная
5.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.10	0.10	0.02	0.02	точная
6.	0.20	0.20	0.20	0.20	0.08	0.08	0.02	0.02	точная

Наивысшая точность при классификации принимаемых сообщений была достигнута в 6-ой серии экспериментов.

Согласно таблице 1 будем считать, что “да”=1, а “нет”=0 для возможных значений анализируемых параметров сообщения. Тогда для идеального сообщения имеем сигнатуру “11111111” при значении интегральной оценки равном 1. Введем классы почтовых сообщений и установим границы интегральной оценки степени безопасности. В качестве значений границ примем результаты из 6-ой серии экспериментов.

Таблица 3

Значения интегральных оценок для различных классов сообщений

Название класса сообщения	Интервал значения интегральной оценки степени безопасности
Инфицированное	совпадение сигнатуры кода вложения с сигнатурой опасного кода
Возможное заражение	$\geq 0,00$ и $< 0,70$

Небезопасное	$\geq 0,70$ и $< 0,92$
Безопасное	$\geq 0,92$

Выводы. Исследована возможность использования в качестве правила определения степени безопасности почтового сообщения косвенных признаков наличия вирусов и потенциально опасного кода. При анализе статистических данных, полученных в результате применения разработанной проху-серверной программы, установлены параметры почтовых сообщений, значения которых влияют на степень их безопасности, и определены степени влияния каждого из параметров на интегральную оценку. Выделены 4 класса почтовых сообщений, для которых установлены границы значений интегральной оценки степени безопасности. Разработанная система обеспечивает точную классификацию как на тестовых наборах данных, так и в отношении вновь поступающих сообщений. При смене политики безопасности возможна адаптация системы путем смены значений весовых коэффициентов или значений границ интегральной оценки для выделенных классов безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Diapankar DasGupta. Artifikal Immune Systems and Their Applikations. Springer-Verlag New York, Incorporated, 1998.
2. S. Hofmeyr, S. Forrest. Architekture for Artifikal Immune System. // Evolutionari Computation 7(1):45-68, the Massachusetts Institute of Technology, 1999.
3. Волковский О.С., Фенога Д.А. О применении иммунных систем для защиты от несанкционированного доступа по компьютерной сети// Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов.-Выпуск 5(16), Днепропетровск, 2001.-с.127-130.
4. Волковский О.С., Комарова М.Г. Синтез адаптивных правил идентификации пакета при построении системы безопасности компьютерной сети //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. -Выпуск 2(31), Днепропетровск, 2004.-с.109-114.

Получено 21.12.2007 г.

МОДЕЛЮВАННЯ І ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ МАТЕРІАЛІВ У НВЧ КАМЕРАХ ПРОМЕНЕВОГО ТИПУ

Вступ. Важливою задачею у створенні нових технологій на основі НВЧ нагрівання є розробка комплексного підходу до їх моделювання та проектування. Такий підхід, на основі системного аналізу, повинен враховувати розв’язок задач електродинаміки, теплофізики, техніко - економічної оптимізації, способів енергопідводу. Це дозволить вирішити проблему синтезу оптимальних робочих камер променевого типу та моделювання процесів нагрівання і сушіння в електромагнітному полі НВЧ з урахуванням фазових перетворень. Застосуванням математичних методів у проектуванні установок доведено, що результати розрахунку процесу сушіння суттєво залежить від того, враховується або ні вплив фазових перетворень [1-3].

Слід зазначити, що врахування фазового перетворення дає можливість дослідити фізичний механізм процесу НВЧ термообробки матеріалу та його закономірності, а це є основою математичного моделювання процесу сушіння.

Постановка задачі. Високоінтенсивний процес сушіння в умовах дії діелектричного нагрівання у НВЧ установках описується наступною системою рівнянь електродинаміки і тепломасопереносу з певними крайовими та початковими умовами [1]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= k_{11} \nabla^2 u + k_{12} \nabla^2 t + k_{13} \nabla^2 p, \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} &= k_{21} \nabla^2 u + k_{22} \nabla^2 t + k_{23} \nabla^2 p + \frac{q}{c\rho}, \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= k_{31} \nabla^2 u + k_{32} \nabla^2 t + k_{33} \nabla^2 p \end{aligned} \quad (1)$$

де $\vec{E}, \vec{H}$ - вектори напруженості електричного і магнітного поля, $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ - вектор електричної індукції, $\vec{B} = \mu \vec{H}$ - вектор магнітної індукції, ε, μ - абсолютні діелектрична і магнітна проникності, $\vec{j} = \delta \vec{E}$

- густина току провідності, δ - питома провідність, $q/c\rho$ - питома потужність джерел НВЧ енергії, u - вологовміст, $t = \bar{t} - t_0$ - температурний напір, p - тиск водяних парів, ρ - густина, k_{ij} ($i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$) - коефіцієнти переносу.

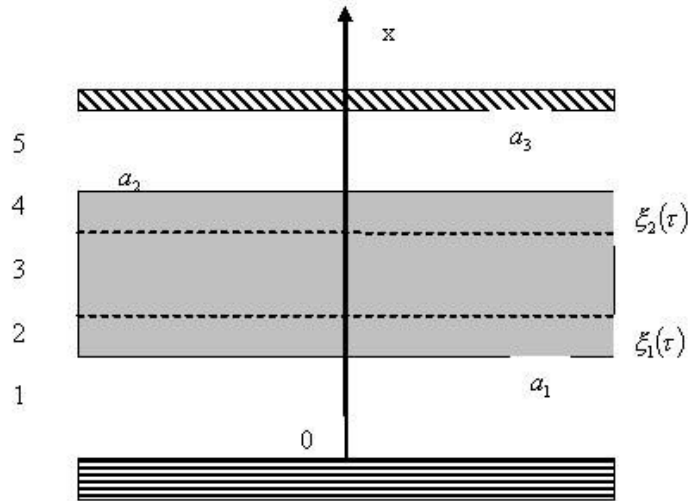


Рисунок 1 - Схема розповсюдження електромагнітної хвилі у багатошаровому середовищі (1, 5 – повітря, 2, 4 – волога зона матеріалу, 3 – суха зона матеріалу)

Електромагнітні поля, згідно своєї природи, породжують розвиток внутрішніх полів у матеріалі сушіння. Такі поля характеризуються відповідними градієнтами температури, вологовмісткості, тиску, які є рухомими силами внутрішнього масопереносу.

Розглянемо процес сушіння матеріалу в камері променевого типу, розтин якої показано на рис.1.

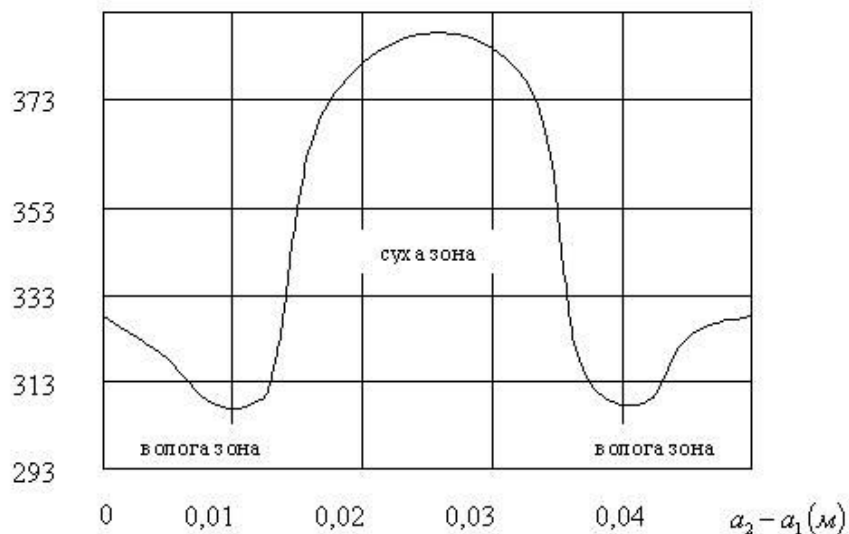


Рисунок 2 - Розподіл температури по товщині діелектрика
($\tau = 160\text{с.}$, $f = 2450\text{МГц}$)

Розподіл температури у матеріалі за умови врахування фазового перетворення „рідина - пар” описується наступною крайовою задачею:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i^2 \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} + q \quad (2)$$

$$t_i(0, x) = t_0 \quad (3)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=a_1} = \alpha_1 (t_2(\tau, a_1) - t_{c1}), \quad (4)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi_1(\tau)} - \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=\xi_1(\tau)} = \rho L \frac{d\xi_1}{d\tau}, \quad (5)$$

$$t_2(\tau, \xi_1(\tau)) = t_3(\tau, \xi_1(\tau)) = t_f, \quad (6)$$

$$t_3(\tau, \xi_2(\tau)) = t_4(\tau, \xi_2(\tau)) = t_f, \quad (7)$$

$$-\lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=\xi_2(\tau)} + \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=\xi_2(\tau)} = \rho L \frac{d\xi_2}{d\tau}, \quad (8)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=a_2} = \alpha_2 (t_4(\tau, a_2) - t_{c5}), \quad (9)$$

де $i = 2, 3, 4$; $q = 0,5\omega\varepsilon'\varepsilon_0\text{tg}\delta|\vec{E}|^2$, L - теплота фазового перетворення „рідина - пар”.

Розв’язок задачі. Для визначення електромагнітного поля у зоні випромінювача система рівнянь Максвелла і теплопровідності (1) розв’язується за умови нормального падіння плоскої електромагнітної хвилі на плоску поверхню матеріалу. Тоді для випадку гармонічних коливань будемо мати наступне хвильове рівняння для кожного шару заданого середовища [5]:

$$\frac{d^2 E_i}{dx^2} = k_i^2 E_i, \quad (10)$$

де E - комплексна функція напруженості електричного поля у певному шарі, $k_i = \alpha_i + j\beta_i$ - коефіцієнт розповсюдження, α_i, β_i - коефіцієнт згасання та хвильове число відповідно, яке залежить від електрофізичних властивостей $\varepsilon', \text{tg}\delta$.

Загальний розв’язок рівняння має вигляд

$$E_i = C_{1i}e^{-k_i x} + C_{2i}e^{k_i x}. \quad (11)$$

Тоді напруженість магнітного поля у кожному шарі буде дорівнювати

$$H_i = \frac{k_i}{j\omega\mu_i\mu_0} (C_{1i}e^{-k_ix} + C_{2i}e^{k_ix}). \quad (12)$$

Для визначення сталих C_{1i}, C_{2i} використаємо наступні умови:

$$\begin{aligned} E_0 &= C_{11} + C_{21}, x = 0, \\ E_1 &= E_2, H_1 = H_2, x = a_1, \\ E_2 &= E_3, H_2 = H_3, x = \xi_1, \\ E_3 &= E_4, H_3 = H_4, x = \xi_2, \\ E_4 &= E_5, H_4 = H_5, x = a_2, \\ E_5 &= 0, x = a_3. \end{aligned}$$

Враховуючи значення E_i і H_i перепишемо ці умови у вигляді:

$$C_{1i}e^{-k_ix} + C_{2i}e^{k_ix} = C_{1i+1}e^{-k_{i+1}x} + C_{2i+1}e^{k_{i+1}x}, \quad (13)$$

$$\frac{k_i}{j\omega\mu_i\mu_0} (C_{1i}e^{-k_ix} + C_{2i}e^{k_ix}) = \frac{k_{i+1}}{j\omega\mu_{i+1}\mu_0} (C_{1i+1}e^{-k_{i+1}x} + C_{2i+1}e^{k_{i+1}x}), \quad (14)$$

$$C_{15}e^{-k_5a_3} + C_{25}e^{k_5a_3} = 0, \quad (15)$$

$$i = 1, x = a_1; \quad i = 2, x = \xi_1; \quad i = 3, x = \xi_2; \quad i = 4, x = a_2,$$

де C_{1i}, C_{2i} - сталі значення, які у фіксовані моменти часу визначаються системою десяти алгебраїчних рівнянь, що розв'язується у системі Mathcad 2000 [4]. Слід зазначити, що при розрахунках використовують густину потужності.

Розподіл температури у вологій зоні 2. Не зменшуючи узагальнення щодо крайових умов, будемо припускати, що вони однорідні (перетворення неоднорідних крайових умов до однорідних наведено у роботі [1]) і використовуючи метод розв'язку задач з рухомими межами [2], запишемо :

$$t_2(\tau, x) = \frac{2}{\xi_1 - a_1} \sum_{n=1}^{\infty} \Omega_n^{(1)}(\tau) V_n^{(1)}(\tau, x), \quad (16)$$

$$\text{де } V_n^{(1)}(\tau, x) = \cos \frac{v_n(x - a_1)}{\xi_1 - a_1} - \frac{\alpha_1(\xi_1 - a_1)}{v_n \lambda_2} \sin \frac{v_n(x - a_1)}{\xi_1 - a_1}, \quad v_n \quad - \quad \text{корені}$$

характеристичного рівняння $\operatorname{tg} v_n = \frac{v_n \lambda_2}{\alpha_1(\xi_1 - a_1)}, \quad \Omega_n^{(1)}(\tau) = \int_{a_1}^{\xi_1} t_2(\tau, x) V_n^{(1)}(\tau, x) dx.$

Для визначення коефіцієнтів $\Omega_n^{(1)}(\tau)$ функціонального ряду одержана наступна задача Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\Omega_n^{(1)}(\tau)}{d\tau} + \left(\frac{v_n}{a_2} \right)^2 = \int_{a_1}^{\xi_1} t_2 \frac{\partial V_n^{(1)}}{\partial \tau} dx + q_n^{(1)}(\tau), \quad (17)$$

$$\Omega_n^{(1)}(0) = \int_{a_1}^{\xi_1(0)} t_0 V_n^{(1)}(0, x) dx = \frac{(\xi_1(0) - a_1) t_0}{\nu_n} \left[\sin \nu_n + \frac{\alpha_1 (\xi_1(0) - a_1)}{\nu_n \lambda_2} (\cos \nu_n - 1) \right], \quad (18)$$

$$q_n^{(1)}(\tau) = \int_{a_1}^{\xi_1} q V_n^{(1)} dx.$$

Розподіл температури у сухій зоні 3 має наступний вигляд:

$$t_3(\tau, x) = \frac{2}{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \Omega_n^{(2)}(\tau) V_n^{(2)}(\tau, x), \quad (19)$$

$$\text{де } V_n^{(2)}(\tau, x) = \sin \frac{n\pi(x - \xi_1)}{\xi}, \quad \xi = \xi_2 - \xi_1, \quad \Omega_n^{(2)}(\tau) = \int_{\xi_1}^{\xi_2} t_3(\tau, x) V_n^{(2)}(\tau, x) dx.$$

$$\frac{d\Omega_n^{(2)}}{d\tau} + \left(\frac{n\pi a_2}{\xi} \right)^2 \Omega_n^{(2)} = q_n^{(2)}(\tau) + \frac{n}{\xi} \sum_{m=1}^{\infty} [(-1)^{m+n} \dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_1] m \gamma_{nm} \Omega_m^{(2)}, \quad (20)$$

$$\gamma_{nm} = \frac{2}{m^2 - n^2}, \quad m \neq n,$$

$$\gamma_{nm} = \frac{1}{2n^2}, \quad m = n,$$

$$\Omega_n^{(2)}(0) = \int_{\xi_1(0)}^{\xi_2(0)} t_0 \sin \frac{n\pi(x - \xi_1(0))}{\xi(0)} dx, \quad (21)$$

$$q_n^{(2)}(\tau) = \int_{\xi_1}^{\xi_2} q \sin \frac{n\pi(x - \xi_1)}{\xi} dx.$$

Розподіл температури у вологій зоні 4:

$$t_4(\tau, x) = \frac{2}{a_2 - \xi_2} \sum_{n=1}^{\infty} \Omega_n^{(3)}(\tau) V_n^{(3)}(\tau, x), \quad (22)$$

$$\Omega_n^{(3)}(\tau) = \int_{\xi_2}^{a_2} t_4(\tau, x) V_n^{(3)}(\tau, x) dx,$$

$$V_n^{(3)}(\tau, x) = \sin \frac{\mu_n(x - \xi_2)}{a_2 - \xi_2},$$

$$\mu_n - \text{корені характеристичного рівняння } \operatorname{tg} \mu_n = \frac{\mu_n \lambda_4}{\alpha_2(a_2 - \xi_2)},$$

$$\frac{d\Omega_n^{(3)}(\tau)}{d\tau} + \left(\frac{\mu_n a_4}{a_2 - \xi_2} \right)^2 \Omega_n^{(3)} = \int_{\xi_2}^{a_2} t_4 \frac{\partial V_n^{(3)}}{\partial \tau} dx + q_n^{(3)}(\tau), \quad (23)$$

$$\Omega_n^{(3)}(0) = \int_{\xi_2(0)}^{a_2} t_0 V_n^{(3)}(\tau, x) dx = \frac{t_0(a_2 - \xi_2(0))(1 - \cos \mu_n)}{\mu_n}, \quad (24)$$

$$q_n^{(3)}(\tau) = \int_{\xi_2}^{a_2} q V_n^{(3)} dx.$$

Розв'язок сформульованої задачі дозволяє вирішити проблему проектування оптимальних робочих камер та моделювання процесів

нагрівання і сушіння в електромагнітному полі НВЧ з урахуванням закону руху меж сухої зони.

Відомо [3], що в якості критерію оптимальності перевodu об'єкта з початкового теплового стану у заданий стан може бути вибрана точність перевodu, що дозволяє визначити час початку квазістаціонарного теплового процесу. Тоді маємо:

$$\max|t - t_s| \leq \eta, \quad (25)$$

де η - величина допуску на рівномірність нагрівання, t_s - задана температура.

Враховуючи особливості процесу сушіння матеріалу у робочій камері променевого типу, введемо наступні обмеження:

для рухомих нижньої і верхньої меж сухої зони повинна виконуватись умова

$$\xi_1 + \xi_2 \leq a_2 - a_1, \xi_1 \geq 0, \xi_2 \geq 0, \quad (26)$$

для температури навколишнього середовища

$$t_1 \leq t_0 \leq t_m, \quad (27)$$

для потужності НВЧ генератора

$$q_1 \leq q \leq q_2, \quad (28)$$

для температури матеріалу

$$t(\tau, x) \leq t_f, \quad (29)$$

для коефіцієнту стоячої хвилі за напруженням, який визначає ступінь погодження НВЧ камери і лінії подачі електромагнітних коливань

$$1 \leq k \leq k_m. \quad (30)$$

Такий підхід дозволяє розробити алгоритм і програмне забезпечення розрахунку сушіння матеріалу, а також у подальшому розв'язати задачі оптимізації та управлінням процесом.

Чисельна реалізація

Для розрахунків використовувались наступні вхідні дані для діелектрика (плита деревени бука):

$$a_2 - a_1 = 0,05 \text{ м}, t_0 = 293,15 \text{ К}, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$C = 1717 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \rho = 1560 \text{ кг/м}^3, \varepsilon' = 3,4, \text{tg} \delta = 0,17, t_c = 293,15 \text{ К},$ густина потужності дорівнює 3 Вт/см^2 , частота дорівнює $2450 - 3000 \text{ МГц},$
 $\alpha_1 = 140 \text{ Вт/(м}^2 \text{К)}, \alpha_2 = 120 \text{ Вт/(м}^2 \text{К)}, L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$

Розподіл температури у сухій та вологій зонах наведено на рис.2.

Висновок щодо положення по товщині діелектрика мінімальних та максимальних температур збігається з результатами роботи [5]. Слід зазначити, що наявність температури, величина якої більше 373 K у середній частині матеріалу, надає можливість прискорити процес сушіння матеріалу і зберегти його поверхню від пошкодження (наприклад розтріскування для лісоматеріалів). Час сушіння всього матеріалу визначається за умови співпадання меж фазових перетворень з його поверхнями, обмеження (26).

Задача оптимізації НВЧ нагрівання включає наступні етапи:

1. Визначається мінімальна потужність НВЧ генератора за умовою (28), для якої максимальна температура сухої зони набувала значення t_f за час τ ,

2. Перевіряється критерій оптимальності (25),

3. Якщо критерій не виконується, то збільшується за обмеженням (27) температура навколишнього середовища до одержання необхідного рівномірного нагрівання,

4. Визначається коефіцієнт стоячої хвилі згідно обмеження (30).

Оптимізація нагрівання матеріалу в умовах імпульсної дії НВЧ генератора потужності 500 Вт показала, що за умови $\eta = 288\text{ K}$, $\tau = 0,5$ години поле температур у матеріалі відповідало заданій рівномірності нагрівання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. -К: Наукова думка, 1983. – 352 с.
2. Яковенко В.А. Математическая модель сверхвысокочастотного нагрева диэлектрического материала и теплообмена при его фазовом превращении // Вісник Запорізького державного університету. Випуск 1.- Запоріжжя: ЗДУ.-2001.- С.137-142.
3. Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В. СВЧ электротермические установки лучевого типа. Саратов: СГТУ, 2000. - 122 с.
4. Дьяконов В.П. Mathcad 2000. – СПб: Питер, 2001. – 592 с.
5. Тригорлый С.В. Оптимизация термообработки диэлектриков в СВЧ камерах лучевого типа // Вестник Саратовского государственного технического университета. Випуск 1. - Саратов: СГТУ.- 2006. - С. 58-66.

Получено 27.01.2008 г.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Введение

В настоящее время широкое распространение получила технология Data Mining - технология добычи знаний из большого массива данных. Одним из главных математических инструментов, используемых этой технологией, является кластерный анализ входного множества данных. При этом кластер рассматривается как набор объектов, имеющих существенное сходство между собой и отличающихся от объектов, принадлежащих другим кластерам.

Кластерный анализ все чаще применяется в маркетинговых исследованиях. При этом решается, в первую очередь, проблема группировки. Речь может идти о продуктах, клиентах, рынках сбыта. Однако, программные средства, наиболее полно реализующие этот аппарат (SPSS, STATISTICA), [1, 2] требуют как высокой математической подготовки исследователя, так и определенного опыта в аналитической работе на конкретном рынке. Каждый раз перед аналитиком стоит не только задача выбора адекватного алгоритма кластеризации, но и проблема квалифицированной интерпретации результатов.

Чаще всего применение кластерного анализа в маркетинговых исследованиях связано с задачей сегментации. Решение этой задачи приводит к идентификации устойчивых групп потребителей, каждая из которых объединяет в себя индивидуумов с похожими характеристиками.

Исследователи отмечают, что формальный подход к этой процедуре приводит к ошибкам в подборе характеристик, на основе которых проводится кластеризация. Главным критерием часто является доступность данных, а не их информативность. Однако включение даже небольшого количества незначимых характеристик может привести к неадекватному разбиению на кластеры [3].

Особый интерес, в приложении к маркетинговым исследованиям, вызывают алгоритмы кластеризации для качественных шкал. К качественным шкалам относят:

а) номинальную шкалу (обычно используется для регистрации пола, рода занятий, обычного места покупки того или иного товара и т.д.)

б) порядковую шкалу (экспертные оценки, оценки предпочтений, шкала возрастных интервалов и др.)

На сегодняшний день предложено свыше десятка методов для работы с качественными данными [4]: например, семейство иерархических кластерных алгоритмов. Одним из наиболее эффективных считается алгоритм *LargeItem*, который основан на оптимизации некоторого глобального критерия. В общем случае наличие глобального критерия дает возможность гораздо быстрее проводить кластерный анализ, чем при использовании локального критерия при парном сравнении объектов, поэтому “глобализация” оценочной функции считается наиболее перспективным путем получения масштабируемых алгоритмов.

На этом же принципе основан алгоритм *CLOPE*, предложенный в 2002 году группой китайских ученых. Он обеспечивает более высокую производительность и лучшее качество кластеризации в сравнении с алгоритмом *LargeItem* и многими иерархическими алгоритмами [5, 6].

В основе алгоритма *CLOPE* лежит идея максимизации глобальной функции стоимости, которая повышает близость транзакций в кластерах при помощи увеличения параметра кластерной гистограммы.

С помощью параметра, названного авторами *CLOPE* коэффициентом отталкивания, регулируется уровень сходства транзакций внутри кластера, а, значит, и окончательное количество кластеров. Этот коэффициент подбирается пользователем. Чем больше коэффициент отталкивания, тем ниже уровень сходства и тем больше кластеров будет сгенерировано.

Таким образом, анализ существующих алгоритмов кластеризации позволил выявить ряд проблем, актуальных для такой предметной области, как автоматизация маркетинговых исследований:

При использовании существующих программных средств возможны ошибки в подборе характеристик (в частности, включение в анализ малозначимых переменных), на основе которых проводится кластеризация, что приводит к неадекватному разбиению на кластеры.

Большинство алгоритмов требует начального указания количества кластеров, что не всегда оправдано с практической точки зрения и может привести к потере более удачного разбиения.

Выбор алгоритмов и метрик требует высокой квалификации исследователя.

Постановка задачи

Задача настоящего исследования состоит в том, чтобы разработать эффективный алгоритм для решения задач кластеризации данных маркетинговых исследований, измеренных на качественных шкалах. Решение этой задачи является частью проекта создания специализированного программного обеспечения для проектирования маркетинговых исследований, а также ввода и анализа полученных данных. Исходные данные далее полагаются структурированными и классифицированными в соответствии с типами шкал и видами вопросов.

Результаты

Рассмотрим основные элементы предлагаемой методики.

Формирование и редукция признакового пространства

В разрабатываемой системе принята пятиуровневая классификация вопросов анкеты, изображенная на рис. 1 (окружностями отмечены наблюдаемые переменные D_k , представленные набором значений $\{P_{k1}, \dots, P_{ki}\}$ (частоты выбора респондентами i -того варианта ответа), $i=2 \dots 10$. Переменные D_k измерены на качественных шкалах. Уровни организованы таким образом, что содержат статистически независимые переменные. Базовая переменная D_b выбирается среди вопросов первого уровня – в ее терминах формируется описание будущего кластера. Значения базовой переменной далее именуются категориями респондентов или категориями базовой переменной. В данной работе рассматривается пример с базовой переменной «Возраст респондентов», принимающей 10 значений: «до 18 лет», ..., «более 65 лет».

Общий принцип формирования набора признаков показан на рис. 1. По указанной схеме последовательно осуществляется кросс-табуляция базовой и прочих переменных исследования D_k . Пропущенные данные заменяются средними значениями соседних категорий. Переменные ранжируются в соответствии с условием:

$$\text{cov}(D_{\sigma}, D_k) \rightarrow \max \quad (1)$$

Далее, в соответствии с (1) выделяются 4 переменных, наиболее информативных с точки зрения последующей кластеризации. При этом выделенные переменные D_k могут быть измерены на порядковых или номинальных шкалах, их табулированные значения P_{kij} , для каждой j -той категории базовой шкалы имеют интервальный характер (см. рис. 2).

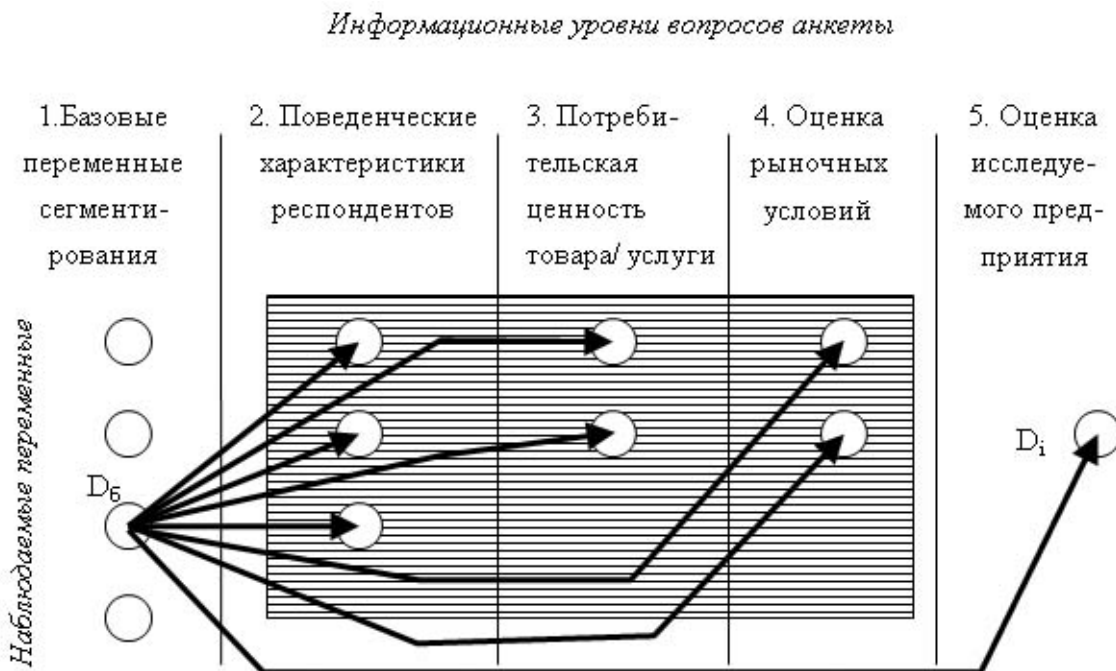


Рисунок 1 - Уровневая организация данных маркетингового исследования и организация поиска значимых данных

С целью исключения шума, в каждой выбранной переменной исключаются из рассмотрения значения, для которых:

$$D_{ij} = \min(P_{ij}^{\max}) - \max(P_{ij}^{\min}) \diamond 0 \quad (2)$$

здесь $P_{ij}^{\max}, P_{ij}^{\min}$ - верхние и нижние значения интервала соответственно.

Следует отметить, что обычно с использованием (2) исключаются из анализа частоты выбора респондентами таких вариантов ответов, как «затрудняюсь ответить», «нет».

Далее значения переменной D_k ранжируются в соответствии с критерием:

$$k_k = \frac{D_{kij}}{\min(P_{kij}^{\max})} \blacklozenge \max. \quad (3)$$

Таким образом, коэффициент k_k отражает разделяющую силу значения P_{kij} и для каждой из четырех выявленных ранее переменных можно получить набор модифицированных значений $k_k P_{kij}$, отражающих характер отклика каждой j -той категории базовой переменной на i -тый вариант ответа k -того вопроса анкеты (рис. 3).

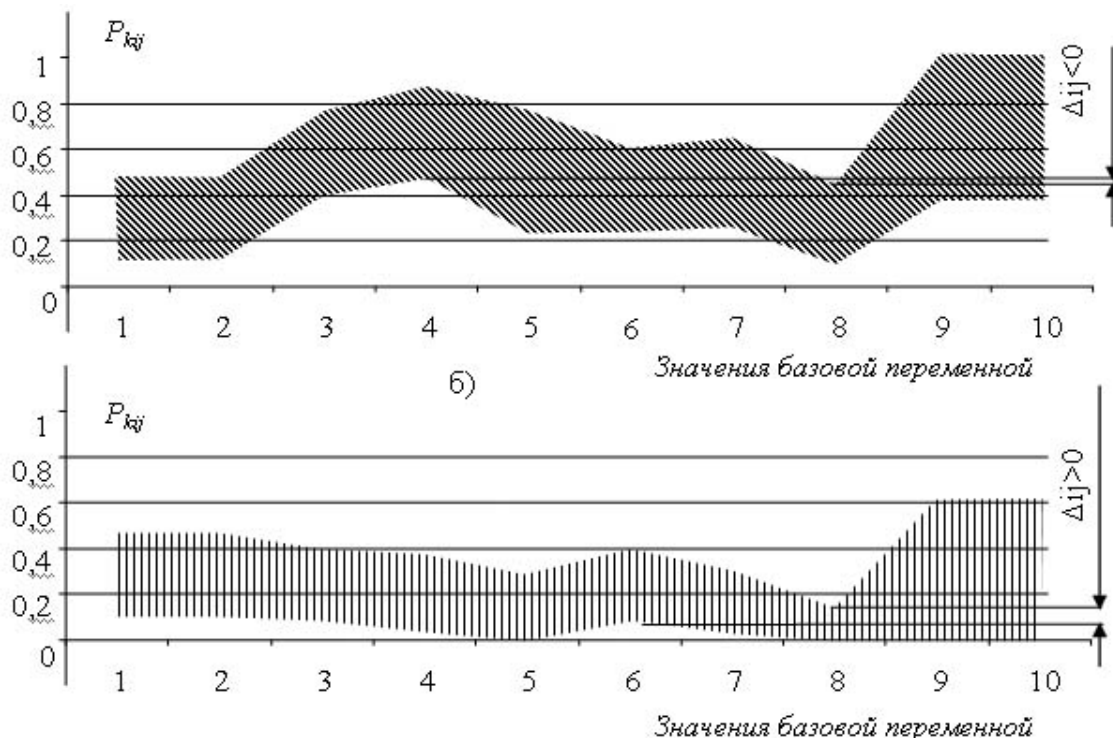


Рисунок 2 - Примеры включаемых в анализ (а) и исключаемых из анализа (б) значений переменных, полученных в результате кросс-табуляции

Таким образом, итоговое значение P_k переменной D_k можно представить в виде произведения векторов, скалярные значения которых равны $k_k P_{kij}$, исходящих из одной точки под углами, кратными π/m , где m – количество оставшихся после редукции значений переменной D_k . Тогда общую характеристику категорий базовой переменной можно представить лепестковой диаграммой, приведенной на рис. 4. Последующая свертка количества измерений путем получения для каждой категории значений P_1-P_2 и P_3-P_4 позволяет представить исходные данные в виде, приведенном на рис.5.

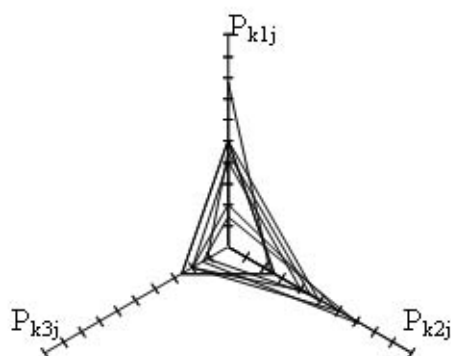


Рисунок 3 - Распределение модифицированных значений переменных для десяти категорий базовой шкалы

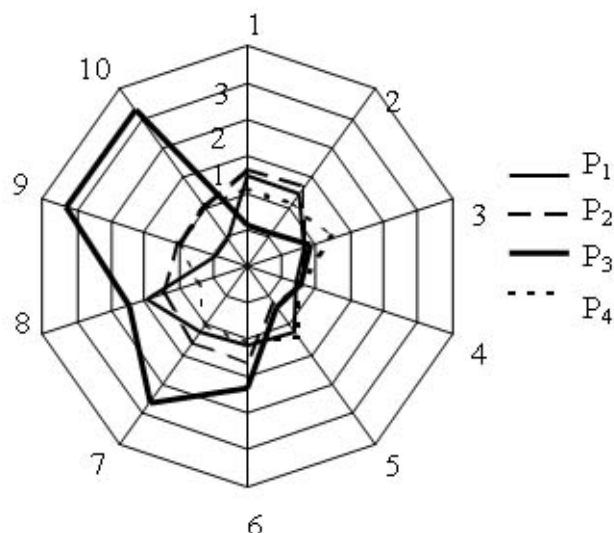


Рисунок 4 - Общая характеристика 10 категорий базовой переменной с использованием модифицированных переменных

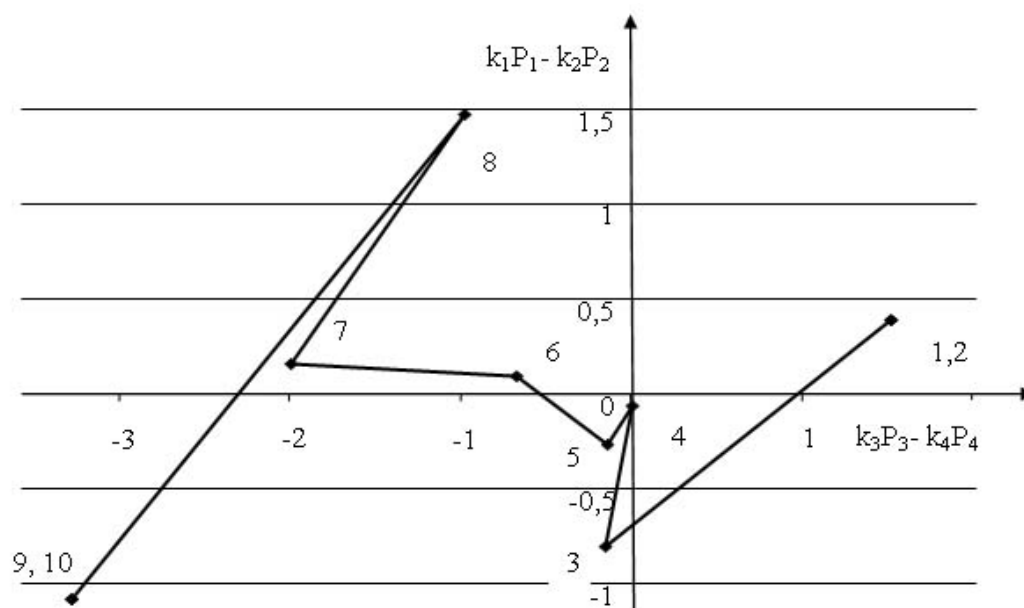


Рисунок 5 - Результат редукции признакового пространства (точки соединены в порядке следования категорий базовой переменной)

Математическая постановка задачи

Таким образом, постановку задачи кластеризации с использованием порядковой шкалы можно сформулировать следующим образом: имеется множество векторов $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, где n – количество категорий базовой переменной. Каждый из векторов характеризуется углом α_n , отражающим характер реакции респондентов, отнесших себя к n -той категории, на вопросы анкеты 2-5 уровней (свойство n -той категории респондентов) и длиной l_n

(степень выраженности свойства). Необходимо осуществить разбиение указанного множества на m кластеров. При этом количество кластеров не задано, однако практическую ценность имеют разбиения с $1 < m \leq 4$. Каждый сформированный кластер G_m может состоять из одного и более элементов. Кластеры в данном случае представляют собой секторы, ограниченные углами $\alpha_m^{\min}$ и $\alpha_m^{\max}$. Пример исходных данных с основными обозначениями приведен на рис. 6.

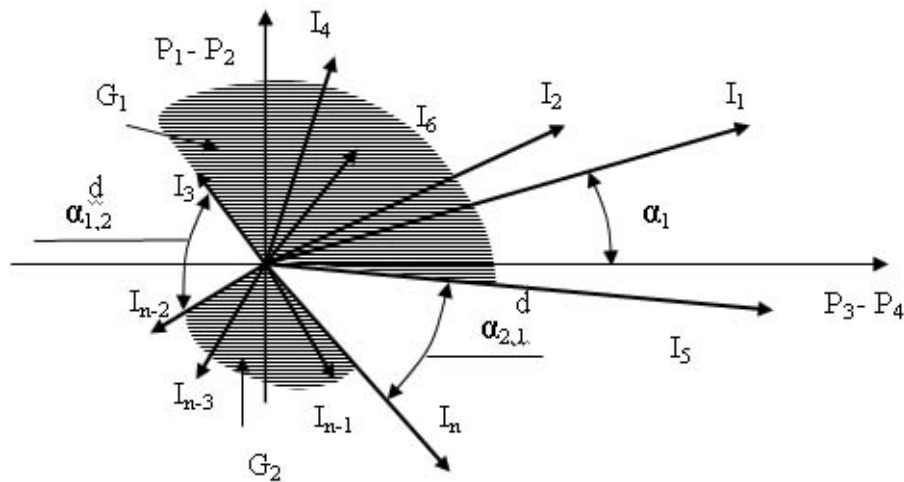


Рисунок 6 - Математическая постановка задачи кластеризации множества векторов I

Условимся, что

$$\alpha_m^{\max} - \alpha_m^{\min} < \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

исключив, таким образом, возможность включения в одну группу категорий респондентов с полярно противоположным откликом на вопросы анкеты.

Из определения порядковой шкалы следует, что крайние векторы набора I не могут принадлежать одному и тому же кластеру:

$$\diamond G_1(I_1 \diamond G_1 \diamond I_n \diamond G_m), \quad (5)$$

$$\diamond G_m(I_1 \diamond G_1 \diamond I_n \diamond G_m). \quad (6)$$

Тогда справедливо следующее утверждение:

$$\diamond (I_k, I_{k+1} | k > 1 \diamond k + 1 < n \diamond I_k \diamond G_{m-1} \diamond I_{k+1} \diamond G_m) \diamond |\alpha_k - \alpha_{k+1}| = \alpha_{m-1,m}^d, \quad (7)$$

где $\alpha_{m-1,m}^d$ - величина, отражающая степень различия кластеров G_{m-1} и G_m (разделяющий угол). Из выражений (5, 6) также следует:

$$\alpha_{m-1,m}^d \diamond \alpha_{1,n}. \quad (8)$$

Понятие схожести векторов в данной постановке задачи целесообразно дополнить условиями:

$$\bar{\sigma}_{m-1,m}^d \diamond \frac{\bar{\sigma}_m^{\max} - \bar{\sigma}_m^{\min}}{\text{card}G_m - 1} \diamond \max, \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_{m-1,m}^d > \min(\bar{\sigma}_{1,2}, \bar{\sigma}_{2,3}, \dots, \bar{\sigma}_{n-1,n}). \quad (10)$$

Предложенная форма представления данных позволяет сформулировать еще одну важную закономерность, действующую для порядковой шкалы:

$$\diamond(I_k | \diamond(I_i, I_{i+1} | (\bar{\sigma}_i \diamond \bar{\sigma}_k \diamond \bar{\sigma}_{i+1}))) \diamond \{I_i, I_{i+1}, \dots, I_k\} \diamond G'_m, \quad (11)$$

где G'_m - субкластер, границы которого пока не определены. Данное правило выполняется, например для вектора I_6 и пары I_2, I_3 на рис. 6, что позволяет сделать вывод о безусловной принадлежности $\{I_2, \dots, I_6\}$ к одному кластеру.

Из (11) следует также правило конкатенации субкластеров:

$$\diamond(G', G'' | \diamond I_i | (I_i \diamond G' \diamond I_i \diamond G'')) \diamond \{G', G''\} \diamond G'_m. \quad (12)$$

Результаты алгоритмизации

Алгоритм кластеризации, основанный на (4-12) можно представить в виде одновременного распространения очагов инфекции $\{I_1, \dots, I_k\}$, выявленных с помощью правила (11) в наборе векторов I . При этом оценивается иммунитет всех векторов, примыкающих к очагам, и выбирается один из них, обеспечивающий требование, вытекающее из выражения (9):

$$\bar{\sigma}_m^{\max} - \bar{\sigma}_m^{\min} \diamond \min \quad (13)$$

Безусловно, присоединяется к кластеру вектор, для которого

$$\bar{\sigma}_m^{\min} \diamond \bar{\sigma}_i \diamond \bar{\sigma}_m^{\max}. \quad (14)$$

Вектор считается устойчивым к инфекции, т.е. определенно не относящимся к данному кластеру, если выполняется одно из выражений:

$$\bar{\sigma}_i - \bar{\sigma}_m^{\min} \diamond \frac{p}{2}, \text{ если } \bar{\sigma}_i \diamond \bar{\sigma}_m^{\max}, \quad (15)$$

$$\bar{\sigma}_m^{\max} - \bar{\sigma}_i \diamond \frac{p}{2}, \text{ если } \bar{\sigma}_i \diamond \bar{\sigma}_m^{\min}. \quad (16)$$

Рассмотрим четыре возможных варианта остановки развития очагов инфекции:

1. Одна из границ кластера поглощает первый или последний вектор набора I , а вторая граница не может расшириться в соответствии с условиями (15, 16). В этом случае кластер считается полностью сформированным (см. рис. 7,а).

2. Обе границы кластера совмещаются с первым и последним вектором набора I . В этом случае кластеризация считается невыполнимой.

3. Отсутствуют векторы, не поглощенные каким-либо кластером. Кластеризация считается завершенной.

4. Очередной шаг развития инфекции может привести к слиянию двух субкластеров. Это возможно лишь при выполнении условия (4). В противном случае границы соседних очагов считаются определенными (см. рис. 7,б).

Результаты работы предлагаемого алгоритма на конкретной задаче представлены на рис. 8. В данном случае, на основе анализа переменных «Распределение покупательской активности», «Частота приобретения одежды», «Факторы, влияющие на выбор одежды», «Факт приобретения одежды в магазине N» удалось выделить две возрастных категории респондентов – «до 40 лет» и «от 40 лет и старше», существенно отличающиеся друг от друга с точки зрения потребительского поведения. При формировании маркетинговой политики следует учитывать, что первая категория (наиболее активные покупатели) в меньшей степени интересуются исследуемым магазином, чем вторая, гораздо более пассивная аудитория.

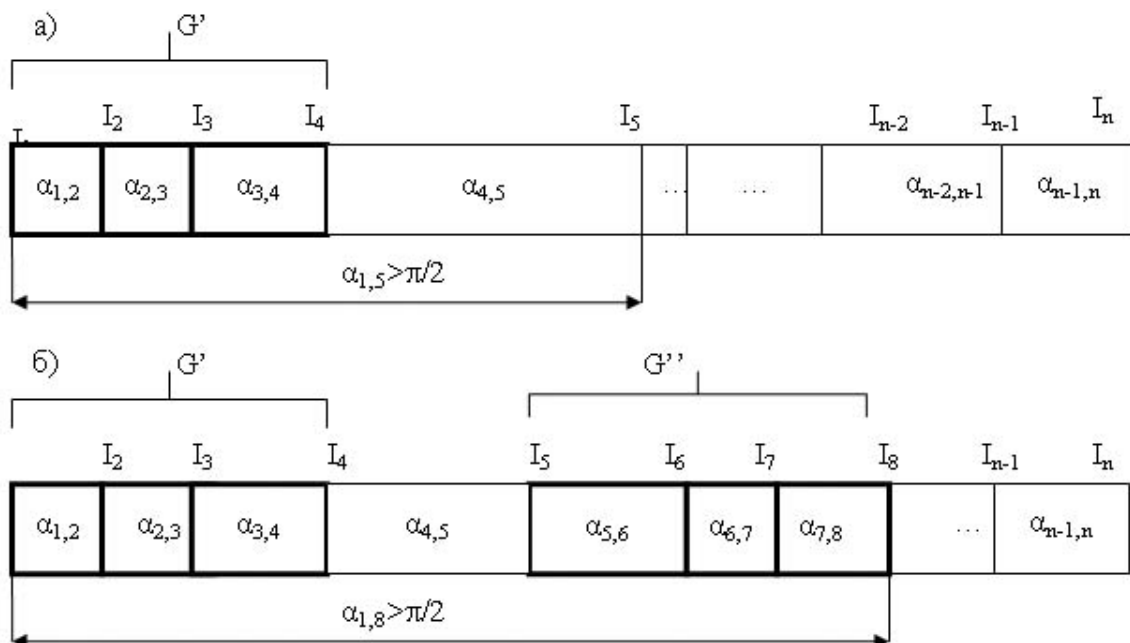


Рисунок 7 - Варианты завершения процесса развития субкластеров

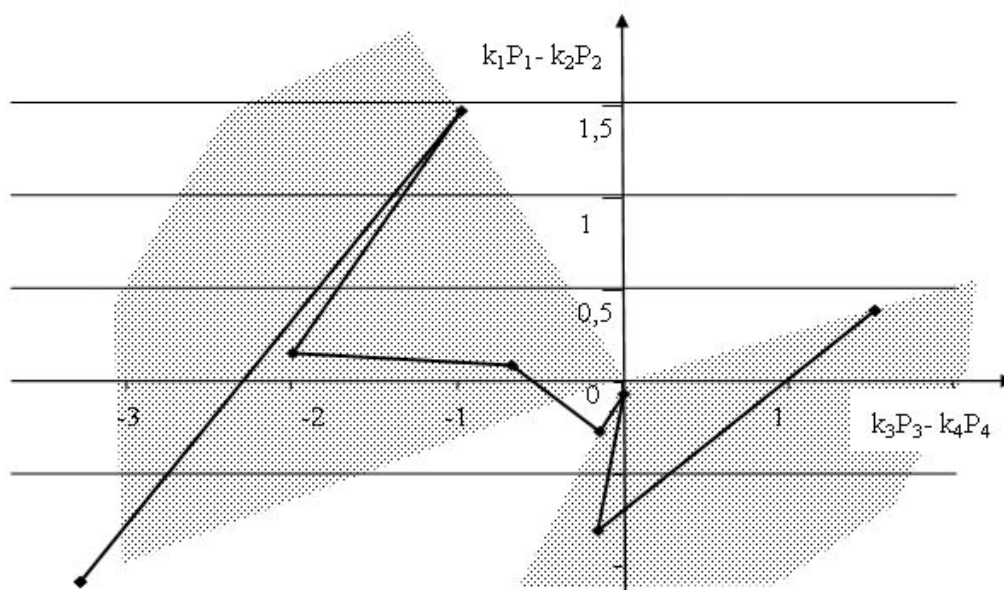


Рисунок 8 - Пример результата кластеризации

Программная реализация

В разрабатываемом программном обеспечении результаты кластеризации интерпретируются как новая латентная переменная исследования. Пользователю предлагается уточнить ее наименование и наименования ее значений (кластеров) – см. рис. 9. Полученная переменная может использоваться в ходе дальнейшего анализа данных.

Обзор

Кластеризация

Базовая переменная:

6) Предложения

7) Частота покупок одежды

8) Главные факторы

9) Возраст

10) Доход

Кластеризация

Отредактируйте описания полученных групп:

<до 18,18-24,25-29,30-34,35-39,>

<40-44,45-49,50-54,55-59,60-64,>

... и наименование переменной:

Группы: Возраст+Распределение покупательской активности (рынки-магазин

Принять

Рисунок 9 - Этап корректировки наименований групп, полученных в результате кластеризации

Выводы

В данной работе, на основе анализа предметной области удалось сформулировать постановку задачи кластеризации данных, полученных в ходе маркетинговых исследований. Предложена эффективная методика формирования и редукции признакового пространства кластеризации. Сформулированы и обоснованы правила кластеризации данных, измеренных на порядковых шкалах. Разработан алгоритм кластеризации, основанный на идее развития очагов инфекции – фрагментов признакового пространства, безусловно принадлежащих к одному и тому же кластеру. Алгоритм не требует предварительного указания количества кластеров, определяет его самостоятельно и выполняет разбиение за один проход. Программная реализация алгоритма в рамках разработанной автором системы проектирования маркетинговых исследований и анализа полученных данных подтверждает его работоспособность и практическую ценность. В настоящее время продолжается работа над процедурой кластеризации с использованием номинальных шкал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Д.Ю., Трошина Т.Л. Кластерный анализ и его применение // http://www.yspu.yar.ru/vestnik/uchenue_praktikam/33_4/
2. Рыбалко В. В. Параметрическое диагностирование энергетических объектов на основе факторного анализа в среде Statistica // Exponenta Pro.— 2004. — N 2.— с. 78-83.
3. Ларин С. В. Выявление обобщенных ассоциативных правил // Exponenta Pro.— 2003.— N 3.— с. 34-38.
4. Punj Girish, Stewart David W. Clustering Algorithms In Marketing Research // Journal of Marketing Research, Vol. XX, (May 1983), pp.134-148
5. Мандель И.Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 176 с.
6. Кластеризация категориальных данных: масштабируемый алгоритм CLOPE // http://www.basegroup.ru/tasks/datamining_prepare.htm
7. Yang, Y., Guan, H., You. J. CLOPE: A fast and Effective Clustering Algorithm for Transactional Data In Proc. of SIGKDD'02, July 23-26, 2002, Edmonton, Alberta, Canada.
8. Wang, K., Xu, C., Liu, B. Clustering transactions using large items. In Proc. CIKM'99, Kansas, Missouri, 1999.

Получено 21.01.2008 г.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ МОКРОГО ТУШЕНИЯ КОКСА

Введение. Важной составляющей, которая в значительной мере предопределяет дальнейшее стабильное развитие горно-металлургического комплекса Украины, является снижение потерь теплоты в различных технологических установках. Одним из примеров энергетически несовершенных технологий, используемых на отечественных коксохимических производствах, является технология мокрого тушения кокса, эксплуатация которой ведёт к потере более чем 40 % теплоты затраченной на обогрев реторт коксовой печи, что и обуславливает относительно низкий тепловой КПД коксохимических производств Украины, который, при тепловом КПД коксовой батареи – порядка 84 %, и, с учётом потери 30 % теплоты в процессах охлаждения коксового газа, для комплекса: коксовая батарея – тушильная башня, без утилизации теплоты мокрого тушения, составляет не более 14,6 %.

Помимо потерь теплоты с парогазовыми выбросами тушильных башен в атмосферу попадают загрязняющие вещества такие как: фенол, аммиак, сероводород и др. Анализ известных технических решений в данной области показал, что существующие теплоутилизационные установки парогазовых выбросов мокрого тушения, выполненные на базе перфорированных лотков, обладают сравнительно низким тепловым КПД ($\leq 51,7\%$), к тому же они не решают проблемы загрязнения атмосферы вредными компонентами парогазовых выбросов и создают предприятиям дебаланс по сточным водам [1]. Именно поэтому исследования направленные на разработку новых теплоутилизационных установок, позволяющих обеспечить энергосбережение и повысить уровень экологической безопасности технологии мокрого тушения кокса представляются весьма актуальными в наше время.

Материал и результаты исследований. В результате теоретических и экспериментальных исследований определены пути повышения эффективности утилизации теплоты парогазовых

выбросов и разработаны новые тепломеханические схемы устройства и системы для мокрого тушения кокса основанные на использовании теплоутилизаторов на основе форсуночных камер со ступенчатым подогревом теплоносителя и возможностью достижения теплового КПД порядка 93 – 95% [2-5].

Важным итогом проведенных исследований тепломассообменных процессов при охлаждении и конденсации пара из парогазовой смеси в форсуночных камерах стало получение новой эмпирической зависимости между произведением коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности и определяющими параметрами тепломассообмена в форсуночной камере, а также зависимостей для определения параметров работы форсуночных камер с заданной тепловой эффективностью выражаемой тепловым КПД в диапазонах параметров парогазовой смеси, характерных для технологии мокрого тушения кокса [6].

Подстановка данных полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований в алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты парогазовых выбросов позволяет решить задачу энергосбережения и обеспечить экологическую безопасность технологии мокрого тушения кокса.

С учётом вышесказанного, алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты парогазовых выбросов представляется в следующем виде:

1. Исходными данными к расчётам технологических параметров системы утилизации теплоты при мокром тушении кокса являются зависимости для интенсивности парообразования в процессах мокрого тушения от времени цикла тушения $D_n(\tau)$; отношение мгновенных расходов пара и газов в цикле тушения $D_n(\tau)/g_z(\tau)$; доля физической теплоты кокса идущей на парообразование $\chi(\tau)$; зависимость плотности парогазового потока от времени с момента начала цикла тушения $\rho_{ngc}(\tau)$; глубина прогрева транзитных тушильных вод $W(\tau)$, температура парогазового потока на входе в контактный аппарат t_w ; скорость парогазового потока на входе в контактный теплоутилизатор W_{ngc} ; температура воды, подаваемой на тушение t_{mv} . Эти данные представляются в виде графических зависимостей получаемых экспериментальным путём, по результатам измерений на действующих тушильных башнях и в целом аналогичны

представленным в работе [1]. К известными технологическими параметрами мокрого тушения относятся следующие: время тушения τ ; масса кокса, подаваемого в установку для мокрого тушения кокса за один цикл m_k . Для оперирования такими графическими зависимостями необходимо установить количество теплоты вносимой в установку для мокрого тушения кокса за цикл тушения и средний тепловой поток вносимый за цикл тушения и определяемый по известным зависимостям [1, 6, 7]:

$$Q_K = m_K c_K \Delta t; \text{ кДж} \quad (1)$$

$$Q'_K = \frac{Q_K}{\tau}, \text{ кВт} \quad (2)$$

где m_K - масса кокса в загрузке тушильного вагона, кг;

c_K - средневзвешенная теплоёмкость кокса за цикл тушения кокса, принимается в интервале температур Δt от 1000 до 250 °С;

τ – продолжительность цикла тушения, с.

Масса кокса в загрузке тушильного вагона определяется с учётом конструктивных характеристик по формуле: $m_K = \rho_K V_{т.в.}$, кг, где ρ_K - истинная плотность насыпной массы кокса, кг/м³ (определяется по справочным таблицам); $V_{т.в.}$ – объём загрузки кокса в тушильный вагон, обслуживающий данную установку для мокрого тушения кокса, м³. Для повышения точности расчётов теплоёмкость кокса целесообразно определять по формуле В.Б. Глейбмана. Точность расчётов проверяется выполнением условия тождественности балансового уравнения тепловых потоков в тушильной камере, а практическим итогом расчетов является установление распределения тепловых потоков в тушильной камере установки для мокрого тушения кокса. Для повышения точности расчёта можно дополнительно определить величины теплового потока, вносимого в тушильную башню с продуктами горения кокса. Исследования представленные в работах [1, 3] позволили установить параметры парогазового потока на выходе из тушильной камеры, включая плотность 1,1 - 0,7 кг/м³ и температуру 37 - 94 °С, что позволило сделать вывод, что для условий «закрытой» тушильной камеры и при своевременном отводе теплоты и конденсата из ступенчатого контактного теплоутилизатора, температура парогазовой смеси будет близка к 100 °С.

2. Определение конструктивных параметров и режимов работы теплоутилизатора выполненного на основе форсуночных камер производится с использованием эмпирической зависимости для произведения коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности и определяющих параметров тепломассообмена в форсуночных камерах, в качестве которых приняты критерии и коэффициенты входящие в теоретическую зависимость академика А.Н.Колмогорова и характеризующие качественные параметры работы форсунок [6]:

$$yF/A_l = B \cdot (d_k^y/d_{\vartheta})^{2,32} Re_{\vartheta}^{0,56}. \quad (3)$$

Зависимость 3 получена для следующего диапазона параметров парогазовой смеси на входе в форсуночную камеру: 1) температура парогазовой смеси на входе в ФК экспериментальной установки t_{ex} , °C: 95 - 110; 2) массовая доля пара в парогазовой смеси φ , %: 4 – 30; 3) абсолютное давление на входе в ФК P_{ex} , кПа: 91,2 – 131,7, что соответствует условиям работы теплоутилизаторов на основе форсуночных камер в тушильных башнях установок мокрого тушения кокса. Применение зависимости 3 целесообразно в комплексе с разработанным алгоритмом определения параметров работы характеристического элемента (единичная форсунка и ограниченный объём в зоне её действия) с заданной тепловой эффективностью выражаемой тепловым КПД детально представленным в работе [6], что позволяет определить численные значения качественных параметров работы форсунок Re_{ϑ} и d_k^y/d_{ϑ} , для условий характеристического элемента форсуночной камеры экспериментальной установки. Условия распространения данных полученных результатов на характеристические элементы форсуночных камер промышленного теплоутилизатора представляются в виде [6]:

$$\frac{d_k}{d_{\vartheta}} Re_{\vartheta}^2 = \frac{d_{k1}}{d_{\vartheta1}} Re_{\vartheta1}^{n1}; \quad (4)$$

$$(d_k^y/d_{\vartheta})^{2,32} Re_{\vartheta}^{0,56} = (d_{k1}^y/d_{\vartheta1})^{2,32} Re_{\vartheta1}^{0,56}, \quad (5)$$

где $Re_{\vartheta1}$, $d_{k1}^y/d_{\vartheta1}$ – качественные параметры работы форсуночного устройства промышленной технологии;

n_1 – константа распределения для форсуночного устройства промышленного контактного теплоутилизатора.

Зависимости 4, 5 действуют для геометрически подобных камер и позволяют обобщить опыт распыливания и сформулировать условия выбора для 160 типов тангенциальных механических форсунок. При этом количество форсунок в контактном теплоутилизаторе определяется исходя из его пространственных характеристик при обязательном выполнении условия полного раскрытия факела распыла в первой фазе дробления струи [6, 9].

3. Определение параметров теплообменника тепловой сети производится по известным методикам изложенным в работах [10, 11], однако, в ходе расчета необходимо учитывать цикличность работы технологии мокрого тушения кокса. Для этого количество утилизированной теплоты, аккумулируемое в элементах системы утилизации теплоты и мокрого тушения кокса, должно быть достаточным для передачи стабильного теплового потока с постоянными параметрами нагрева теплоносителя тепловых сетей. Исходя из необходимости выполнения данного требования подбираются размеры накопительных ёмкостей ступеней контактного теплоутилизатора.

Поток теплоты в теплообменнике тепловых сетей определяется по формуле:

$$Q_{ТЦ} = G_{ТЦ} c (t_1' - t_1''), \text{ кВт} \quad (6)$$

где $G_{ТЦ}$ – суммарный расход теплоносителя на выходе из ступеней контактного теплоутилизатора, кг/с;

c – теплоёмкость теплоносителя, кДж/кг·°С;

t_1' – среднемассовая температура на выходе из контактного теплоутилизатора, °С;

t_1'' – температура на входе в первую ступень контактного теплоутилизатора, °С.

Среднемассовая температура определяется по формуле:

$$t_1' = \frac{G_{ВЫХ1}^{ОБЩ} t_1 + G_{ВЫХ2}^{ОБЩ} t_2}{G_{ВЫХ1}^{ОБЩ} + G_{ВЫХ2}^{ОБЩ}} \cdot \text{°С} \quad (7)$$

где сумма в знаменателе представляет собой суммарный расход теплоносителя на выходе из I-ой и II-ой ступени контактного аппарата, а параметры t_1 , t_2 – температуры теплоносителя на выходе из соответствующих ступеней, °С.

Расход теплоносителя в трубном пространстве (в случае рекуперативного кожухотрубчатого теплообменника тепловой сети) определяется по формуле:

$$G_T = G_{TC} \frac{\tau_{TC}}{\tau_{TC} + \tau_{MC}}, \text{ кг/с} \quad (8)$$

где τ_{TC} – продолжительность цикла тушения кокса, с;

τ_{MC} – межцикловой промежуток времени, с.

Расход воды в межтрубном пространстве рассчитывается по формуле:

$$G_{MT} = \frac{Q_{TC}}{c(t_2'' - t_2')} \cdot \frac{\tau_{TC}}{\tau_{TC} + \tau_{MC}} \cdot \text{кг/с} \quad (9)$$

Тепловой поток, передаваемый системой утилизации теплоты оборудованной теплоутилизатором на основе форсуночных камер со ступенчатым подогревом теплоносителя, через рекуперативный теплообменник в тепловые сети, определяется по формуле:

$$Q = Q_{TC} \frac{\tau_{TC}}{\tau_{TC} + \tau_{MC}} \cdot \text{кВт} \quad (10)$$

После установления величин потоков тепловых и массовых потоков в теплоутилизаторе системы утилизации теплоты мокрого тушения кокса производится стандартный расчёт поверхности теплообмена в теплообменнике тепловых сетей по методикам изложенным в работах [10, 11]. При расчете данного элемента алгоритма необходимо учитывать что максимальные параметры теплоносителя на выходе из теплоутилизатора существенно ограничивает возможности передачи теплоты существующими тепловыми сетями, поэтому, при нагреве теплоносителя в теплообменнике по стороне тепловых сетей на 15 – 20 °С, потребуется дополнительный подогрев в котельных установках или теплообменниках ТЭЦ до параметров востребованных конечными потребителями.

4. Определение параметров парогазового потока на входе в газоочистку и подбор газоочистки, производится на основании данных завода изготовителя [5, 12] и результатов расчёта отходящих парогазовых потоков после теплоутилизатора системы утилизации теплоты мокрого тушения кокса, в соответствии с рекомендациями представленными в пункте 2.

5. Определение параметров гидравлической схемы подачи теплоносителя и подбор арматуры, трубопроводов и насосов, производится по стандартным методикам изложенным в работах [13, 14], исходя из расходов теплоносителя в контурах системы и с учётом местных и линейных сопротивлений.

6. Определение параметров потребления электроэнергии и эксплуатационных затрат на выработку теплоты, проверка экономических показателей работы системы и её элементов. Решение поставленной в данном элементе алгоритма сложной задачи связано с необходимостью определения критериев и коэффициентов эффективности в их связи со сроками окупаемости мероприятий по внедрению предложенных систем. Оценка эффективности систем утилизации теплоты процессов мокрого тушения кокса производится на основании анализа технико-экономических показателей её работы.

Общими характеристиками эффективности работы таких систем является величина удельного и общего выхода вторичных энергоресурсов в условиях коксохимических производств, соответственно [15]:

$$q_{уд}^T = m (c_1 t_1 - c_2 t_2) = m \Delta h; \quad (11)$$

$$Q_{вых} = q_{час} \times \tau, \quad (12)$$

где m – удельное количество кокса, охлаждаемого в установках для мокрого тушения кокса, содержащего энергетический потенциал в виде физической теплоты, кг;

t_1 – температура кокса на входе в тушильную камеру, $^{\circ}\text{C}$;

c_1 – теплоёмкость кокса, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$;

t_2 – температура кокса на выходе из тушильной камеры, $^{\circ}\text{C}$;

c_2 – теплоёмкость кокса на выходе из тушильной камеры, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$;

$q_{час}$ – часовой выход вторичных энергоресурсов в виде парогазовых выбросов, кДж ;

τ – время работы установки, ч.

Коэффициент использования выработанной теплоты [15]:

$$\sigma = Q_n / Q_T, \quad (13)$$

где Q_T – выработка теплоты в теплоутилизационной установке за счёт вторичных энергоресурсов, кДж ;

Q_n – использование тепловых вторичных энергоресурсов, кДж .

Академик М.В.Кирпичев предложил оценивать тепловую эффективность на основании энергетического коэффициента:

$$\Theta = Q / (A \Sigma N), \quad (14)$$

где ΣN - суммарные затраты мощности на сопротивление в форсуночной камере;

$A = 1/427$ - тепловой эквивалент работы, ккал/кг·м;

Q - количество переданной теплоты в теплоутилизаторе, ккал/ч.

Кроме указанных критериев и коэффициентов необходим подбор критериев на основании которых производится оценка конструктивных решений. Такие критерии могут быть получены только на основе анализа технико-экономических показателей работы системы. Автором предложено использовать показатель для технико-экономической оценки принятия конструкторских решений:

$F = C \times N \times t_{\text{эк}} + Z$, где C - стоимость вида потребляемого элементом технологической схемы энергоносителя для данного предприятия, грн/ед. потреб. мощности; N - мощность потребляемого энергоресурса; $t_{\text{эк}}$ - срок эксплуатации элемента системы, часов; Z - капитальные затраты, эксплуатационные затраты (кроме потребляемых энергоресурсов), амортизационные отчисления и т. п. за время эксплуатации элемента системы, грн.

Требование минимизации показателя F является ключевым при выборе конструктивных решений для различных вариантов оборудования элементов системы утилизации теплоты мокрого тушения кокса. Капитальные и эксплуатационные затраты определяются по итогам расчётов в соответствии с алгоритмом определения параметров систем утилизации теплоты и обезвреживания вредных выбросов при мокром тушении кокса.

Выводы

1. Разработан алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса.
2. Определены критерии оценки выбора конструктивных параметров элементов систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса;
3. Нашли дальнейшее развитие работы по повышению тепловой эффективности и экологической безопасности технологии мокрого тушения кокса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайленко А.А., Семенов В.С. Утилизация тепла и снижение вредных выбросов при мокром тушении кокса // Экологические проблемы в энергетике. - М.: ВНИПИЭнергоПром.- 1990.
2. Патент Украины №42199А. Пристрій для мокрого гасіння кокса. / Суртаев В.В., Суртаев В.М.- БИ. №9.-2001.
3. Суртаев В. В. Система утилизации тепла и обезвреживания вредных выбросов при мокром тушении раскालённого кокса // Научно-технический сборник: Разработка рудных месторождений.- 2002. -№78.-С.150-154.
4. Патент Украины №44003А. Система для мокрого гасіння розжареного коксу. / Суртаев В.В., Суртаев В.М.- БИ. №1.- 2002.
5. Суртаев В. В. Перспективные направления обеспечения экологической безопасности установок утилизации теплоты мокрого тушения кокса // Энергетика: экономика, технологии, экология. - НТУУ КПИ.- №1.-2004.-С.77-81.
6. Суртаев В. В. Математическое моделирование и экспериментальные исследования процессов контактного тепломассообмена в характеристическом элементе теплоутилизатора выполненного на базе форсуночной камеры // Энергетика: экономика, технологии, экология. - НТУУ КПИ.- 2007.-№2.-С.88-93.
7. Справочник коксохимика в 6-ти томах /Под ред. А. И. Шелкова.- М.: Металлургия.- 1965.
8. Мучник Д. А., Постольник Ю. С. Теория и техника охлаждения кокса. – Киев-Донецк.: Вища школа.- 1979.
9. Хавкин Ю. И. Экспериментальное определение качества распыливания топлива центробежными форсунками большой производительности /В кн.: Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики.- Алма-Ата: Наука.- 1966.-С. 70-80.
10. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. - М.: Госхимиздат.- 1961. - 820 с.
11. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообменника. – М.: Атомиздат.- 1979. - 416 с.
12. Каталог технологий фирмы «Haldor Topse A/C» (Дания) / Технологии охраны среды.- 2000.-26 с.
13. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука.- 1978.- 736 с.
14. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. - М.: Изд-во иностр. лит.- 1959. - 520 с.
15. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы. Справочник под ред. Григорьева, В. М. Зорина. - М.: Энергия.- 1980.-528 с.

Получено 25.01.2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Старушенко Г.А., Рогоза Б.Е. Обзор и анализ применения Трехфазной модели в механике композитов. Часть II.....	3
Лигун А.А., Шумейко А.А., Тимошенко Д.В. О локализации и формировании символов в электронных документах со сложным фоном	13
Цвиркун Л.И., Трипутень С.Н. Разработка математической модели механической части стенда с неустойчивым динамическим объектом лаборатории дистанционного обучения через интернет	25
Григоренко В.У., Маркевич И.В. Анализ деформационных и силовых параметров процесса холодной периодической роликовой прокатки на базе разработанной компьютерной реализации его математического описания	37
Даниленко Б.Д., Кравченко Ю.Г. Оптимізація умов точіння відбілених чавунів пластинами із ПКНБ.....	44
Павленко А.М., Чейлытко А.А. К вопросу о проектировании вихревых испарительных камер с подвижной зоной вскипания	52
Петренко А.Н., Кучеренко А.Е. Нейросетевой метод решения обратной задачи электроимпедансной томографии	58
Сергеева Ю.Н., Черниченко В.Е., Горбунов А.Д. Особенности сжигания водомазутных эмульсий.....	66
Соколовская И.Е., Кошлак А.В., Черниченко В.Е., Павленко А.М. Моделирование теплофизических свойств пористого материала при изменении его теплового состояния	72
Денисенко О.І. Оперативна діагностика стану електротермічних пристроїв програмно-апаратного комплексу	79
Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Бойко М.Н. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей	93
Волковский О.С. Исследование возможностей распознавания удаленных сетевых атак на уровне приложений	103
Яковенко В.А. Оптимизация процесса сушки материалов в СВЧ камерах лучевого типа	108
Сайко В.В. Кластеризація даних маркетингових досліджень	115
Суртаев В.В. Алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса	126

РЕФЕРАТЫ

УДК 539.3

Старушенко Г. А., Рогоза Б. Є. **Огляд та аналіз застосування трифазної моделі в механіці композитів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.3-12.

В роботі приведений огляд розв'язків задач для композитів з циліндровими й сферичними включеннями з використанням трифазної моделі; представлені основні принципи побудови трифазної моделі та одержані на її основі результати.

Трифазна модель застосована для визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності двофазного мікронеоднорідного композитного матеріалу, що складається з безперервної матриці та періодично розташованих в ній циліндрових включень. Розв'язок задачі одержано на основі теорії осереднення з подальшим використанням ряду асимптотичних спрощень, зокрема, методу варіації форми межі. Одержані асимптотичні співвідношення й проведений аналіз розв'язку, що підтверджують достатню точність результатів у всьому діапазоні зміни геометричного розміру включень та їх фізичної характеристики, включаючи граничні випадки.

УДК 004.91

Лигун А.А., Шумейко А.А., Тимошенко Д.В. **Про локалізацію та формування символів у електронних документах зі складним фоном** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.13-24.

В роботі розглядається алгоритм локалізації та формування символів на складному фоні, що базується на оптимальному L_2 квантуванні. На першому етапі кожна точка зображення за околицією аналізується на предмет розташування біля границі символу. На другому етапі проводиться уточнення позицій символу та побудова самого символу, що представляє собою зв'язну множину точок.

УДК 519.876.2:37.018.4

Цвіркун Л. І., Тріпутень С.М. **Розробка математичної моделі механічної частини стенду з нестійким динамічним об'єктом лабораторії дистанційного навчання через Інтернет** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.25-36.

У нестійкому динамічному об'єкті стенду виділені електрична і механічна частини. Розроблена математичну модель механічної частини стенду, яка приведена до виду двохмасової розрахункової схеми. Одержана передавальна функція механічної частини стенду, що пов'язує момент з кутовою швидкістю системи.

УДК 621.774.35.016.3

Григоренко В.У., Маркевич И.В. **Анализ деформационных и силовых параметров процесса холодной периодической роликовой прокатки на базе разработанной компьютерной реализации его математического описания** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.37-43.

УДК 621.9.01

Даниленко Б.Д., Кравченко Ю.Г. **Оптимізація умов точіння відбілених чавунів пластинами із ПКНБ** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.44-51.

Створена математична модель на основі системи залежностей показників процесу різання від змінних параметрів, технічних обмежень цих показників та технологічної собівартості обробки. Виконані розрахунки режимів різання та геометрії леза пластин із полікристалічного кубічного нітриду бора, проведений аналіз впливу твердості чавунів та технічних обмежень на оціночні показники.

Бібл. 7, табл. 3.

УДК 664.2.032.1

Павленко А.М., Чейлытко А.А. **К вопросу о проектировании вихревых испарительных камер с подвижной зоной вскипания** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.52-57.

УДК 620.179.14

Петренко О.М., Кучеренко О.Є. **Нейромережевий метод вирішення зворотної задачі електроімпедансної томографії** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.58-65.

Запропоновано нейромережевий метод вирішення зворотної задачі електроімпедансної томографії. Послідовно розглянуто етапи вирішення оберненої задачі ЕІТ з використанням нейронної мережі на базі радіальних базисних функцій.

Бібл. 8, іл. 4.

УДК 664.2.032.1

Сергеева Ю.Н., Черниченко В.Е., Горбунов А.Д. **Особенности сжигания водомазутных эмульсий** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.66-71.

В работе приводятся экспериментальные данные о влиянии различных факторов на процессы формирования состава продуктов сгорания водомазутного эмульгированного топлива. Предложена методика и математическая модель, позволяющая прогнозировать количество NO_x в отработанных газах.

УДК 664.2.032.1

Соколовская И.Е., Кошлак А.В., Черниченко В.Е., Павленко А.М.

Моделирование теплофизических свойств пористого материала при изменении его теплового состояния // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.72-78.

В работе приводятся экспериментальные данные о влиянии различных факторов на теплофизические свойства пористых материалов. Предложена методика и математическая модель, позволяющая прогнозировать изменение теплофизических свойств в процессе термообработки.

УДК 681.5:536.587

Денисенко А.И. **Оперативная диагностика состояния электротермических устройств программно-аппаратного комплекса** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.79-92.

Определены совокупности параметров для описания состояния электротермических устройств и совокупности компьютерно измеряемых информативных факторов для текущего расчета на их основе этих параметров с целью обеспечения оперативности диагностики и управления энерговыделением соответствующих устройств программно-аппаратных исследовательских комплексов.

Библ. 9, ил. 4.

УДК 622.788

Ковальов Д.А., Ванюкова Н.Д., Бойко М.М. **Розробка динамічної математичної мо-делі для керування обпалом залізорудних обкотишів, що містять вуглець** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.93-102.

Розроблена математична модель для керування окислювальним обпалом залізоруд-них обкотишів, що містять вуглець, на конвеєрній машині. Модель базується на прин-ципах термодинаміки з врахуванням основних тепло – та масообмінних процесів і до-зволяє розраховувати широкий спектр технологічних параметрів. За допомогою розроб-леної математичної моделі досліджено процес обпалу залізорудних обкотишів з викори-станням комбінованого палива.

УДК 681.3.06

Волковський О.С. **Дослідження можливостей розпізнавання віддалених атак на рівні додатків** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.103-107.

Створена система захисту окремого комп'ютера або комп'ютерної мережі, робота якої заснована на виявленні та інтерпретації коду у поштових повідомленнях, визначенні ступеня їх безпеки за розробленими правилами на основі непрямих ознак.

Бібл. 4, табл. 3.

УДК 536.24

Яковенко В.А. **Оптимизация процесса сушки материалов в СВЧ камерах лучевого типа** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.108-114.

Построена математическая модель процесса нагревания и сушки в электромагнитном поле СВЧ с учетом фазовых превращений для камер лучевого типа. Решение сформулированной задачи позволяет решить проблему проектирования оптимальных рабочих камер и моделирования процессов нагревания и сушки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле с учетом закона движения границы сухой зоны.

Библ. 5.

УДК 681.518:658.18

Сайко В.В. **Кластеризація даних маркетингових досліджень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.115-125.

На основі аналізу предметної області сформульована постановка задачі кластеризації даних, що одержані у результаті маркетингових досліджень. Запропоновано ефективну методику формування та редукції признакового простору кластеризації. Сформульовані та обґрунтовані правила кластеризації даних на порядкових шкалах. Розроблено алгоритм кластеризації, заснований на ідеї розвитку вогнищ інфекції. Алгоритм не вимагає попереднього встановлення кількості кластерів, визначає його самостійно та виконує розбивку за один прохід.

Бібл. 8, іл. 9.

УДК 621.181:62

Суртаев В.В. **Алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 1 (54).- Дніпропетровськ, 2008.- С.126-134.

Разработан алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса и определены критерии оценки выбора конструктивных параметров элементов систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса. Данные результаты исследований позволяют повысить тепловую эффективность утилизации теплоты парогазовых выбросов и обеспечить экологическую безопасность технологии мокрого тушения кокса.

Библ. 15.

UDC 539.3

Starushenko G. A., Rogoza B. E. **The review and analysis of the three-phase model In the mechanics of composite materials** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.3-12.

In the paper the review of the solution of problem for composites with cylindrical and spherical inclusions with using of three-phase model has been conducted; basic principles of construction of three-phase model and received on its basis results were represented.

The three-phase model is used for the determination of the effective heat conductivity of two-phase composite material that has been constructed with continuous matrix and periodical cylindrical inclusions. The solution of problem was received by combination of mathematical theory of homogenisation and asymptotic methods, such as method of boundary form perturbations. Asymptotic approximations are got and analysis of solution was conducted, confirming sufficient accuracy of results in all range of change of the geometrical size of inclusions and their physical characteristics, including limiting cases.

UDK 519.2

A. Ligun, A. Shumejko, D. Timoshenko **About localization and forming of symbols in electronic documents with difficult background** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.13-24.

Based on optimal L_2 quantization algorithm of localization and forming of symbols on difficult background is described. At the first stage each point of image by its neighbor is analyzed for position near the border of symbol. At the second stage the specification of symbol position is spent with building of continues set of point – symbol.

Bibl. 7, Ill. 4.

UDC 519.876.2:37.018.4

Tsvirkun L.I., Triputen S.M. **Development of mathematical model of mechanical part of stand with the unsteady dynamic object of laboratory of the controlled from distance studies over the Internet** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.25-36.

Electric and mechanical parts are selected in the unsteady dynamic object of stand. Developed mathematical model of mechanical part of stand, which is resulted to the type of two-mass calculation chart. The transmission function of mechanical part of stand, relating a moment with the angular of the system, is got.

UDC 621.774.35.016.3

Grigorenko V.U., Markevich I.V. **Analyze of the deformation and power parameters that was based on computer simulation of the cold periodic flatting roller process** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.37-43.

UDC 621.9.01

Danilenko B.D., Kravchenko Yu.G. **Optimization of turning conditions of bleached cast-irons by plates from PCNB** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.44-51.

A mathematical model is created on the basis of the system of dependences of indexes of cutting process from the variable parameters, technical limitations of these indexes and technological prime price of treatment. The calculations of the cutting modes and geometry of blade of plates from polycrystal cubical nitride of boron had been executed, the analysis of influencing of hardness of cast-iron and technical limits on the indexes of evaluations had been conducted.

Bibl. 7, tabl. 3.

UDC 664.2.032.1

Pavlenko A.M., Chejtylo A.A. **About design of the vortical evaporated chambers with the mobile area of boiling up** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.52-57.

UDC 620.179.14

Petrenko O.M., Kucherenko O.E. **Neural-based method for Electrical Resistance Tomography Inverse Problem** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.58-65.

The neural-based method for ERT inverse problem is proposed. Inverse problem analysis is examined step by step basing on examples of inhomogeneous species.

Bibl. 8, il. 4.

UDC 664.2.032.1

Sergeeva Yu.N., Chernichenko V.E., Gorbunov A.D. **Incineration of fuel-oil water emulsions** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.66-71.

In work the experimental data about influence of the various factors on processes of formation of structure of products of combustion water black oil of fuel are resulted. The technique and mathematical model allowing to predict the quantity NO_x in fulfilled gases is offered.

UDC 664.2.032.1

Sokolovskaya I.E., Koshlak A.V., Chernichenko V.E., Pavlenko A.M. **Моделирование теплофизических свойств пористого материала при изменении его теплового состояния** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.72-78.

In work experimental data about influence of different factors on teplofizicheskie properties of porous materials are cited. A method and mathematical model allowing to forecast the change of teplofizicheskikh properties in the process of heat treatment is offered.

UDC 681.5:536.587

Denysenko O.I. **Prompt diagnosis of state of electrothermal devices of software and hardware** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.79-92.

There were determined groups of parameters for description of state of electrothermal devices and groups of informative factors that are measured by a computer. Usage of these factors as a basis for current determination of the former ensures operativeness of diagnosis of state of corresponding devices of software and hardware research complexes and makes it possible to control energy release of the latter.

Libr. 9, ill. 4.

UDC 622.788

Kovalyov D.A., Vanyukova N.D., Boyko M.M. **Development of dynamic mathematical model for management of containing carbon iron ore pellets burning** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.93-102.

The mathematical model is developed for management of oxidizing burning of containing carbon iron ore pellets by the conveyor machine. Model is based on principles of thermodynamics in view of the cores heat - and mass transfer processes also allows to count a wide spectrum of technological parameters. The process of iron ore pellets burning with use of the combined fuel have been investigated by means of the developed mathematical model.

UDC 681.3.06

Volkovskiy O.S. **A research of probabilities of application level remote network attacks identification** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.103-107.

The protection system for the separate computer or computer network is created. System activity is based on detection and interpretation code in e-mail reports, determination their degree of security by designed principles, on basis of indirect characteristics.

Bibl. 4, tabl. 3.

UDC 536.24

Yakovenko V.A. **Optimization of process of drying of materials in the microwave chambers of beam type** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.108-114.

The mathematical model of process of heating and drying in an electromagnetic floor of the microwave in view of phase transformations for chambers of beam type is constructed. The decision of the formulated problem allows to solve a problem of designing of optimum working chambers and modelling of processes of heating and drying in a superhigh-frequency electromagnetic floor in view of the law of movement of border of a dry zone.

Bibl. 5.

UDC 681.518:658.18

Saiko V. **Clustering of marketing research data** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.115-125.

The problem statement of clustering of data received as a result of marketing research has been formulated based on analysis of the knowledge domain. Efficient method of clustering feature space forming and reduction has been offered. Rules for clustering the data measured on ordinal scales have been formulated and grounded. Clustering algorithm based on the infection nidus development concept has been created. The algorithm does not require preliminary indication of clusters' quantity, it determines their number independently and accomplishes the fragmentation during a single cycle.

Bibl. 8, ill. 9.

UDC 621.181:62

Surtayev V.V. **Algorithm of determining parameters of heat recycling circuits in cock wet quenching** // System technologies. - N 1(54). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.126-134.

Algorithm of determining parameters of heat recycling circuits in cock wet quenching have been worked out and criteria of an estimation of a choice of design data of elements of heat recycling circuits in cock wet quenching are determined. The given results of researches allow to heat recycling efficiency improvement and providing environmental safety of cock wet quenching technology.

bibl. 15.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Бойко Максим Николаевич – аспирант, НМетАУ.

Ванюкова Наталья Дмитриевна - д.т.н., профессор, НМетАУ.

Волковский Олег Степанович – к.т.н., доцент кафедры АСОИ ФЭТКС ДНУ.

Даниленко Борис Дмитриевич – к.т.н., доцент кафедры инструментальной техники и технологий Московского государственного технического университета им. М.Е. Баумана.

Денисенко Александр Иванович - к.т.н., доцент кафедры физики НМетАУ.

Ковалев Дмитрий Арсентьевич - д.т.н., профессор, НМетАУ.

Кошлак Анна Владимировна – аспирант, Днепродзержинский государственный технический университет.

Кравченко Юрий Григорьевич – к.т.н., доцент кафедры технологий машиностроения НМетАУ.

Кучеренко Александр Евгеньевич – аспирант кафедры РЭА физико-технического факультета ДНУ.

Лигун Анатолий Александрович - д.ф.-м.н., профессор кафедры Прикладной математики Днепродзержинского государственного технического университета, лауреат гос. премии Украины в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины.

Павленко Анатолий Михайлович - д.т.н., профессор, Днепродзержинский государственный технический университет.

Петренко Александр Николаевич – д.т.н., профессор кафедры РЭА, декан физико-технического факультета ДНУ.

Рогоза Борис Евгеньевич - старший преподаватель кафедры высшей математики Украинского государственного химико-технологического университета.

Сайко Василий Васильевич – к.т.н., доцент, зав. кафедрой управления, и/о проректора по учебной работе, Областное коммунальное высшее учебное заведение «Институт предпринимательства «Стратегия».

Соколовская Ирина Евгеньевна – аспирант, Днепродзержинский государственный технический университет.

Старушенко Галина Аркадиевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий и информационных систем Днепропетровского регионального института государственного управления Национальной Академии государственного управления при Президенте Украины.

Тимошенко Диана Валериевна - аспирант Днепродзержинского государственного технического университета.

Трипутень Сергей Николаевич – преподаватель-стаж. кафедры автоматизации и компьютерных систем, Национальный горный университет.

Цвиркун Леонид Иванович – к.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизации и компьютерных систем, Национальный горный университет.

Черниченко Виктор Егорович – к.т.н., доцент, Кременчугский государственный политехнический университет.

Шумейко Александр Алексеевич - д.т.н., проф. кафедры Программного обеспечения и вычислительной техники Днепродзержинского государственного технического университета.

Яковенко Вадим Александрович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, Академия таможенной службы Украины.